

FABRICATED THE NEW WORLD OF 3D PRINTING

3D打印

从想象到现实

[美] 胡迪·利普森 Hod Lipson 梅尔芭·库曼 Melba Kurman ◎著
赛迪研究院专家组◎译

全球第一本全面讲述3D打印的著作，中英文同步出版

3D打印风靡全球，第三次工业革命的序幕拉开了！

揭开3D打印神秘面纱：让传统制造瞬间过时，规模经济的铁律从此被打破

跨越虚拟世界与实体世界的鸿沟，一场产品制造和设计的革命即将开始，它将颠覆我们的物理世界

张瑞敏：“3D打印对现有企业而言，要么是天使，要么是魔鬼。”

中信出版社·CHINA CITIC PRESS

3D打印 从想象到现实

[美] 胡迪·利普森 Hod Lipson　梅尔芭·库曼 Melba Kurman ◎著
赛迪研究院专家组◎译

"赛迪译丛"系列之二

FABRICATED
THE NEW WORLD OF 3D PRINTING

中信出版社 · CHINA CITIC PRESS · 北京 ·

图书在版编目（CIP）数据
3D打印：从想象到现实/（美）利普森，（美）库曼著；赛迪研究院专家组译. —北京：中信出版社，2013.4
书名原文：Fabricated: The New World of 3D Printing
ISBN 978–7–5086–3858–4
Ⅰ.3… Ⅱ.①利… ②库… ③ 赛… Ⅲ.立体印刷–影响–产业革命–研究–世界–现代 Ⅳ.F149
中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第044424号

3D打印：从想象到现实
著　　者：[美] 胡迪·利普森　梅尔芭·库曼
译　　者：赛迪研究院专家组
策划推广：中信出版社（China CITIC Press）
出版发行： 中信出版集团股份有限公司
（北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座　邮编100029）
（CITIC Publishing Group）
承 印 者：北京京师印务有限公司
开　　本：787mm×1092mm 1/16　　插　页：16

印　　张：20　　字　数：213千字
版　　次：2013年4月第1版　　印　次：2013年4月第1次印刷
京权图字：01–2013–1170　　广告经营许可证：京朝工商广字第8087号
书　　号：ISBN 978–7–5086–3858–4/F·2850
定　　价：49.00元

服务热线：010–84849555　服务传真：010–84849000
投稿邮箱：author@citicpub.com

FABRICATED The New World of 3D Printing

一场产品制造的革命、设计的革命、材料的革命、生物的革命、知识产权的革命即将由3D打印引爆

3D打印技术的远大前景即将展开：跨越虚拟世界与实体世界的鸿沟，规模经济的铁律从此被打破，3D打印将把人工智能从计算机拓展到现实世界，机器人将成为过去时……

在中国：3D打印概念股横空出世、万众瞩目，各大媒体集中、热烈报道，工业和信息化部、科学技术部纷纷制定政策推动3D打印产业化。

3D打印技术与当今发达的数字技术相结合，再加上互联网的普及以及微小而成本低廉的电子电路的广泛使用，技术和社会变革由此爆发。

媒体集中报道，引发中国3D打印热潮

《人民日报》：3D打印成第三次工业革命重大标志

《光明日报》：3D打印开启第三次工业革命大门

《广州日报》：3D打印房子、器官不远了

《上海证券报》：3D打印走进美国小学，英国首创打印房屋概念

中央电视台：3D打印技术兴起，行业人士看好市场

新华网：英设计师用生物塑料制造首个3D打印房屋模型

中国网：人类探月迎新跨越，3D打印技术助力月球基地建设

21世纪网：3D打印概念太疯狂："打印"建筑或将抑制高房价

网易：中国在航空领域商业化3D打印技术

中关村在线：忘了钢琴？王力宏关注3D打印电吉他

中国证券网：万亿3D打印蛋糕全面铺开，12股盛宴开席

腾讯：未来3D打印汽车将成新宠，地面和空中当快车道

网易科技：奥巴马称3D打印技术将推动美国经济增长

中国时刻网：3D打印"智"造美好未来

慧聪机械工业网：奥巴马演讲强调3D打印重要性，3D打印业前景广阔

……

转变经济发展方式迫在眉睫、数百年一遇的发展机遇已经来临面对机遇与挑战，中国应该如何保持经济的可持续发展？如何拓展产业升级思路？如何打造世界一流制造业？

《第三次工业革命》是蓝图

全球正迎来第三次工业革命

一本有可能改变中国命运的书

新华网头条报道，国务院及各部委、各省市高度重视

第一次工业革命使19世纪的世界发生了翻天覆地的变化，第二次工业革命为20世纪的人们开创了新世界，第三次工业革命同样也将在21世纪从根本上改变人们的生活和工作……可持续发展是方向，转变经济发展方式是途径，而第三次工业革命就是我们的蓝图。

《新工业革命》是突破

掀起新一轮制造业革命，改写中国制造业前景

制造业的个性化量产阶段已经来临

重振中国制造业，实体经济需要再回归

在这本书中，作者提到人类的制造业可以分为五个阶段：第一阶段是少量定制，第二阶段是少量标准化生产，第三阶段是大批量标准化生产，第四阶段是大批量定制，第五阶段是个性化量产。该书作者预测，我们现在正处于个性化量产阶段。这一概念推动了产品多样化从定制化量产继续向前发展。该书作者预测，当3D打印技术成为生产的日常部分，大批量个性化时代就真正来临了。

《3D打印》是序幕

全球第一本系统阐述3D打印的书，中英文版同步出版

3D打印让传统制造瞬间过时，规模经济的铁律从此被打破制造业和商业模式发生巨大变革，知识产权将彻底失效

不远的将来，我们完全可以用计算机把自己想要的东西设计出来，然后进行3D打印，就像我们现在可以编辑电子文档一样。通过计算机设计文件或设计蓝图，3D打印技术将把数字信息转化为实体物品。当然，这还不是3D打印的全部，3D打印最具魔力的地方是，它将给材料科学、生物科学带来翻天覆地的变化，最终的结果是科学技术和创新呈现爆发式变革。如美国总统奥巴马所说，3D打印将为几乎所有产品的制造方式带来革命性变化。

《创客：新工业革命》是创造

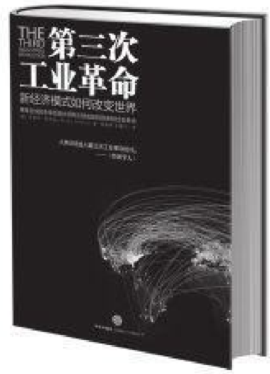
《长尾理论》、《免费》作者克里斯·安德森的最新作品

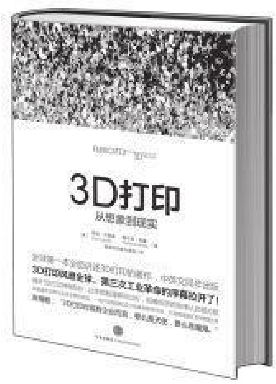
掀起中国开放式创新的制造业革命

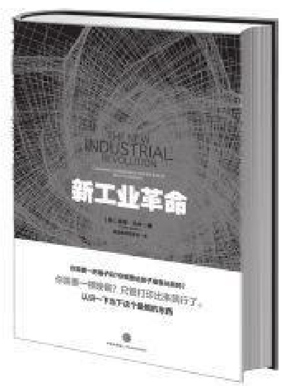
具有划时代意义的新浪潮，全球将实现全民创造

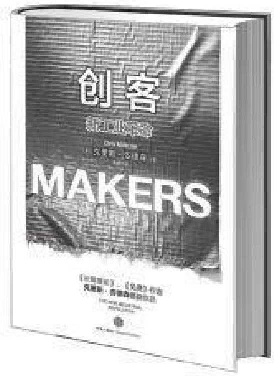
这是一个创客的时代，他们引领科技行业走向一个新的方向，即个体制造时代的到来。该书作者安德森预测，在接下来的10年时间里，人们会将网络的智慧用于现实世界。未来不仅属于建立在虚拟原则之上的网络公司，而且属于那些深深扎根于现实世界的产业。安德森大胆地预测，随着数字设计与快速成型技术赋予每个人发明的能力，创客一代使用互联网的创新模式，必将成为下一次全球经济大潮的弄潮儿。

新科技、新趋势系列读物








创客
MAKERS

目　录

FABRICATED The New World of 3D Printing 推荐序一

3D（Three Dimensions）打印是一种通过材料逐层添加制造三维物体的变革性、数字化增材制造技术，它将信息、材料、生物、控制等技术融合渗透，将对未来制造业生产模式与人类生活方式产生重要影响。

该书是3D打印领域难得的佳作之一，其突出特点是，不拘泥于3D打印工艺技术的细节描述，而是向读者介绍3D打印的理念，重在以发展的眼光、创新的视野，用通俗的语言，从材料、制造、生活、健康、教育、法律和伦理等多角度，激情而不失科学地展望3D打印技术可能给未来制造业、未来社会生产模式与人类生活方式带来的深刻影响和变革。

该书在介绍3D打印制造部件复杂外形和内部结构的超常能力的同时，特别展望了3D打印技术与多材料复合、新材料合成技术的深度融合，由超常特殊功能新材料或超材料制成的部件甚至具备感知、执行和反馈控制等系统主动综合能力，而且还敏锐地察觉到我们进入“机器制造机器”的时代已经不远了。制造—材料—控制的高度融合使人印象深刻，是3D打印技术的重要发展方向，也是该书的一大特点。

两位作者是3D打印领域资深专家，对3D打印技术及其发展的研究充满激情，又不失客观和冷静，而且极具前瞻性，该书还提出了3D打印技术发展可能带来的知识产权及保护、制造者和消费者责任与权益保障、资源浪费、环保污染、毒品及枪支管理、犯罪治安、法律和伦理等一系列社会问题，这也是本书的可贵之处之一。

王华明
北京航空航天大学、教育部长江学者特聘教授
北京市大型金属关键构件激光直接制造工程技术研究中心主任
中国3D打印技术产业联盟理事长

FABRICATED The New World of 3D Printing　推荐序二

人猿相揖别，是因为古人能够手工制造工具。今人区别于古人，是因为能够使用机器制造工具。人类进化至今，一个崭新的文明标志就是能够用机器制造机器。从狭义上说，当前被赋予无限想象力的3D打印机就是这种能够制造机器的机器。

科幻作家科利·多克托罗说过，科幻小说家不擅长预测未来，人们大多是在未来的外衣下描绘现在。那么3D打印技术的未来外衣是什么？

> “在未来（或是在星际纪年的未来），机器可以制造机器。3D打印机就是第一波新一代智能机器，它们能设计、制造、修理、回收其他机器，甚至能够调整和改进其他机器，包括它们自己。”

《3D打印：从想象到现实》的作者胡迪·利普森先生和梅尔芭·库曼女士的定义校正了目前媒体对3D打印技术的过度解读，把梦幻般的3D打印落地到了智能制造。两位作者历时9个月，采访一线的科技工作者，现场考察3D打印实验室和产品设计生产过程，捕捉到了这种智能制造的逻辑轨迹，即控制三篇章：控制物质的形状、控制物质的构成和控制行为，也就是实现物体在结构、材料和活性上的有机统一。

手工控制的局限性很大，后来出现了机械控制；得益于信息技术的发展，机械控制搭上了智能的翅膀。于是，人们逐渐可以控制探测器抵达数十万公里外的月球和火星，小小的支架可以准确放到心脏主动脉的末端，激光打印机可以用红黄蓝自动调兑出万紫千红的色彩。如果把3D打印机看作机器的话，人们所追求的就是有效控制它，让它打印出我们所需要的任何物体。从这种意义上讲，3D打印是对人类控制能力极限的挑战和展示。我们与作者一样，不能预测何时才能真正彻底实现这三种控制，然而可以预见的是，这三种控制能力的阶段性实现都足以引发制造业的巨大变革。目前，3D打印的第一篇章基本谱就，已经给传统的模具工业带来冲击，3D打印的牙齿和助听器已经占据80%的市场。那么同样可以设想在不远的将来：

> “3D打印机可以通过新的方式将原材料加以混合，新型材料就会出现。有了混合材料打印，多元结构的部件将会被同时制造、同时组装出来。在一个较小的范围内，我们将会以纳米级的精度将多种材料嵌入和编排到复杂的微观结构中。”

很难想象在第二篇章的控制实现时，制造行业的格局将产生怎样天翻地覆的变化，那就让我们发挥想象力，憧憬3D打印控制能力的最高境界，比如可以打印三明治、打印身体器官、打印智能机器人……

> “所谓控制行为是指将程序编写进材料，使其具备我们所需要的

> 功能。换句话说，我们不再打印被动的零部件和材料，而是打印能够感知、反应、计算和行为的综合的主动系统。”

面对现实，我们还是要收回驰骋的想象。掩卷而思，其实我们不必知道3D打印机是喷墨的还是激光的，3D打印的模式是堆积的、添加的还是增材的，真正需要了解的是人们对物质结构、材料和活性上的智能控制水平，真正需要不懈探索的是充分把握其中的规律，高度实现三者的有机统一。当我们有一天真正能控制万物的内外结构、材料构成和活性系统时，即使没有3D或4D打印机，我们同样可以智能控制别的机器制造出精彩的世界。

由此说开，当我们剥去3D打印神话般的外衣，就会发现，3D打印实质上是制造业向智能化不断演进的历程。当前我国制造业正面临转型升级挑战，信息化和工业化的深度融合为这一进程提供了前所未有的机遇。3D打印技术的阶段性成功为我国智能制造业的实践展现了光明的前景，坚定了必胜的信念。我想这就是《3D打印：从想象到现实》一书给我们的最大启示，也是我推荐这本书的理由。

罗文
中国电子信息产业发展研究院院长

FABRICATED The New World of 3D Printing　推荐序三

3D打印，造物新纪元

在过去的一年多时间里，3D打印业界进入了高度活跃期，与3D打印相关的新闻和概念频频出现在公众视野中，越来越多的中国民众开始了解3D打印。事实上，3D打印技术和3D打印机在一些欧美发达国家的应用已经相当普遍。

2008年9月，我作为国家公派博士研究生在美国纽约州康奈尔大学胡迪·利普森教授的实验室求学时就第一次看到并使用了3D打印机。那是一台和家用冰箱外形相似的神奇机器，它只用了两个小时就将计算机中一个三维模型变为我手中实实在在的零件，我当时的惊奇与感叹可想而知。在那时，利普森教授和学生们已经在频繁使用实验室中昂贵的工业级3D打印机制造各种机器人零部件了，虽然那时3D打印机所用的材料价格并不便宜。与此同时，利普森教授团队的开源桌面3D打印机Fab@Home、生物材料3D打印机以及多材料混合3D打印等项目也成果颇丰。

我的导师利普森教授为人幽默风趣，经常会和大家讨论一些非常有创意的新点子。他的主要研究领域包括进化计算、3D打印和机器人技术三个方向，而他的成名之作正是一个关于智能机器人利用3D打印机进行自我制造的创新研究项目，其成果文章最终发表在2000年的《自然》杂志上。正是基于多年来对3D打印领域的专注和热爱，利普森教授一直期望出版一本全面介绍3D打印及相关技术的著作。非常令人高兴的是，由利普森教授和库曼女士合著的关于3D打印的新书《3D打印：从想象到现实》终于在2013年年初大功告成，并由美国威立出版社出版发行。在与利普森教授的邮件沟通中得知，该书中文版将由中信出版社出版发行，这对于广大中国读者和关注3D打印技术的朋友来说，是一件令人十分期待的好事。

我十分荣幸在第一时间就得到了威立出版社赠予的英文原稿，以及中信出版社蒋永军主编分享的中文译稿。这是全球第一本全面讲述3D打印技术及其应用的图书，书中展现了利普森教授和库曼女士两位作者多年来对3D打印技术及其产业发展的研究成果，整理了来自于3D打印相关的工业界、学术界和教育界众多人士的不同见解和案例，并且加入了作者对3D打印技术本身的独到分析和大胆预测。

作者从不同层面和角度为读者描述了3D打印的技术原理、历史和现状、广泛应用、未来前景以及困难与挑战。对于中国读者来说，可从以

下几个方面全面了解这本书所涵盖的内容：

1. 3D打印已蔓延至日常生活的每个角落

越来越多的事实表明，3D打印机已不再是设计师和科学家的专属机器，它已经从实验室和工厂逐渐走出来，并且走进学校和家庭，与我们每个普通人的生活息息相关。3D打印的衣服和鞋子已经多次出现在全球各大时装展，3D打印的饼干和蛋糕已经成为一些家庭餐桌上最受欢迎的小点心，3D打印的咖啡桌和个性家具颇受年轻人的喜爱，而在自行车和汽车等交通工具的设计中也越来越多地体现出3D打印元素。从小朋友的“喜羊羊”牙刷和定制玩具，到父母的立体婚纱照，再到爷爷奶奶的助听器和义齿，3D打印让家庭中的每个成员都感到惊喜并从中受益。正如书中所描绘的，3D打印技术正在遵循三步走的发展路线，逐渐从打印物体外形过渡到打印物体内部构成，最终发展到可以打印物体的高级功能和行为的阶段，因此我们相信：在不远的将来，每个人都可以在家中打印可通话的手机、爬来爬去的迷你机器人，以及其他新奇好玩的电子产品。

2. 3D打印将波及各行各业

3D打印这种新式制造方法将使你的工作方式发生巨大改变，也许变得更有效率，也许变得更困难，作者针对这一趋势在书中列举了很多有代表性的案例。如果你是一位中学老师，当你带着花费数小时用3D打印制作的恐龙化石或者喜马拉雅山模型来到教室，这堂课一定会令你的学生们印象深刻；如果你是一位资深医者，当你将带着使用3D打印机制造的与患者身体完美匹配的骨骼或者心脏瓣膜走进手术室时，整个医疗界必定为之振奋；如果你是一位考古工作者，利用3D扫描和3D打印技术快速复制那些脆弱、不可触碰的珍贵文物，那么繁冗细致的考古研究工作必将事半功倍；如果你是一位艺术品设计师，使用3D打印技术实现你的设计，此时自然界中那些美妙复杂的曲线和外形都不再遥不可及，人们的审美标准也会大幅提升。然而，如果你是一位立体雕刻大师，那么3D打印出的作品会使你自叹不如；如果你拥有一间模型制作工厂，3D打印技术极有可能使你的业务量大幅缩水。诸如此类，3D打印必将波及和影响各行各业的工作模式，或者增强很多行业的生命力，也或者导致某些行业走向消亡。

3. 3D打印催生众多新机会，同时也带来很多新挑战

如前文所述，一些传统行业将受到3D打印技术的冲击而逐渐萎缩，然而我们必须意识到3D打印同样会催生大量前所未有的行业和巨大机遇。最显而易见的机会就是，随着廉价家用3D打印机需求的增长，其相关产业链（包括零配件制造、打印材料等行业）也会进入高速发展

期。更重要的机会在互联网领域，围绕3D打印会出现越来越多的电子商务模式，例如在线3D打印服务、个人定制设计制造服务、共享3D打印模型社区以及面向云制造的3D打印网络。与互联网类似，如书中所预言，移动信息平台和智能手机的普及也为某些简单易用却十分有趣的3D打印增值服务提供了理想的应用推广平台。还有就是基于3D打印的实体商业模式将迅速成长，例如遍布大街小巷和旅游景点的3D打印店与3D打印照相馆。

然而，正如作者在书中提到的，我们必须认识到在3D打印创造无数新机会的同时，它也带来了许多前所未有的挑战：3D打印行业的人才培养问题，现有设计软件与3D打印的不匹配问题，3D打印物品的版权和知识产权纠纷问题，以及3D打印设备和3D打印产品的质量安全问题，还有就是3D打印产品对公共安全和环境构成的威胁，等等。这些问题迫切需要3D打印业界人士、产业经济研究者、法律工作者以及公共事务管理者通过共同努力来解决。

4. 3D打印将改变现有产业结构，冲击中国经济模式

毋庸置疑，3D打印将创造新的商业模式，改变现有的产业结构，对世界经济产生巨大影响。最近一段时间，主要发达国家纷纷开始布局，陆续出台了相关政策和投资发展计划，大力发展3D打印产业，旨在占领新工业革命的前沿阵地。一方面，美国总统奥巴马在“国情咨文”中多次提及3D打印，并筹划建立3D打印国家创新中心，旨在提升美国制造业的竞争力；另一方面，从欧美各国最新的太空探索计划中，也可以看到对3D打印技术相关项目的巨额资助。

坦白地讲， 3D打印技术将会给中国产业经济带来一些直接的负面影响。首先，正如作者在书中提到的，随着中国制造业劳动力成本上涨，基于3D打印技术和互联网平台的全球云制造模式将体现出更廉价、更快捷并且更绿色环保的优势，这将极有可能取代现有的中国制造模式。其次，3D打印的广泛应用使得整个产品研发过程都可以在企业内部进行，这将使研发周期缩短并且很好地保护了设计方案。然而，对于大量依靠模仿而生存且缺乏原创设计力量的中国微小企业来说，这无疑是一个沉重的打击。令人欣慰的是，在中国北京、西安、成都和武汉等城市，政府已经陆续开始着手对3D打印相关产业进行布局和规划，从设备研发、软件设计、材料制备和技术服务等众多环节全面鼓励发展3D打印产业。希望中国能够把握此次制造业转型改革机遇，成为世界3D打印产业强国。

总的来看，利普森教授和库曼女士的这本新书非常及时、全面地总结和分析了3D打印领域的主要话题，并且描绘了众多非常引人入胜的

应用前景和产业机会，使我们相信3D打印时代已经到来，我们的生活、工作以及思考方式都会为之改变，世界经济产业格局也将受其影响。作者和译者努力使这本书的语言浅显易懂、叙事简单风趣，因此对于来自各行各业、不同背景的读者来说，如果你对3D打印感兴趣，此书可谓上佳之选。

李曙光
西北工业大学博士后研究员
中国首家3D打印照相馆、3D打印体验馆总策划
利普森教授和库曼女士的学生与好友

FABRICATED The New World of 3D Printing　前言

3D打印领域的大事之一是其进展比光速还快，技术也飞速进步。然而，快速创新这个主题是难以捕捉的。当你试图将一个羞于示人也很难实现的新想法写下来时，它已经过时了，因为每个人都已经改变了。

我们怀着激动的心情，用9个月的时间写成了这本书。在这段时间里，我们通过与熟识的专家交流，不断寻求更广泛的视角。与此同时，我们也热衷于通过网站和推特空间与人们交谈，以获取新的信息。我们的目的不是写一本简单的“如何使用3D打印机”的书，因为这样的书在短短几个月内就会被淘汰。相反，由于技术的发展速度比图书的出版速度还快，我们力图透过表象探索3D打印技术更深层次的含义，探讨这种新的生产模式将如何改变我们的生活、我们的法律和我们的经济。

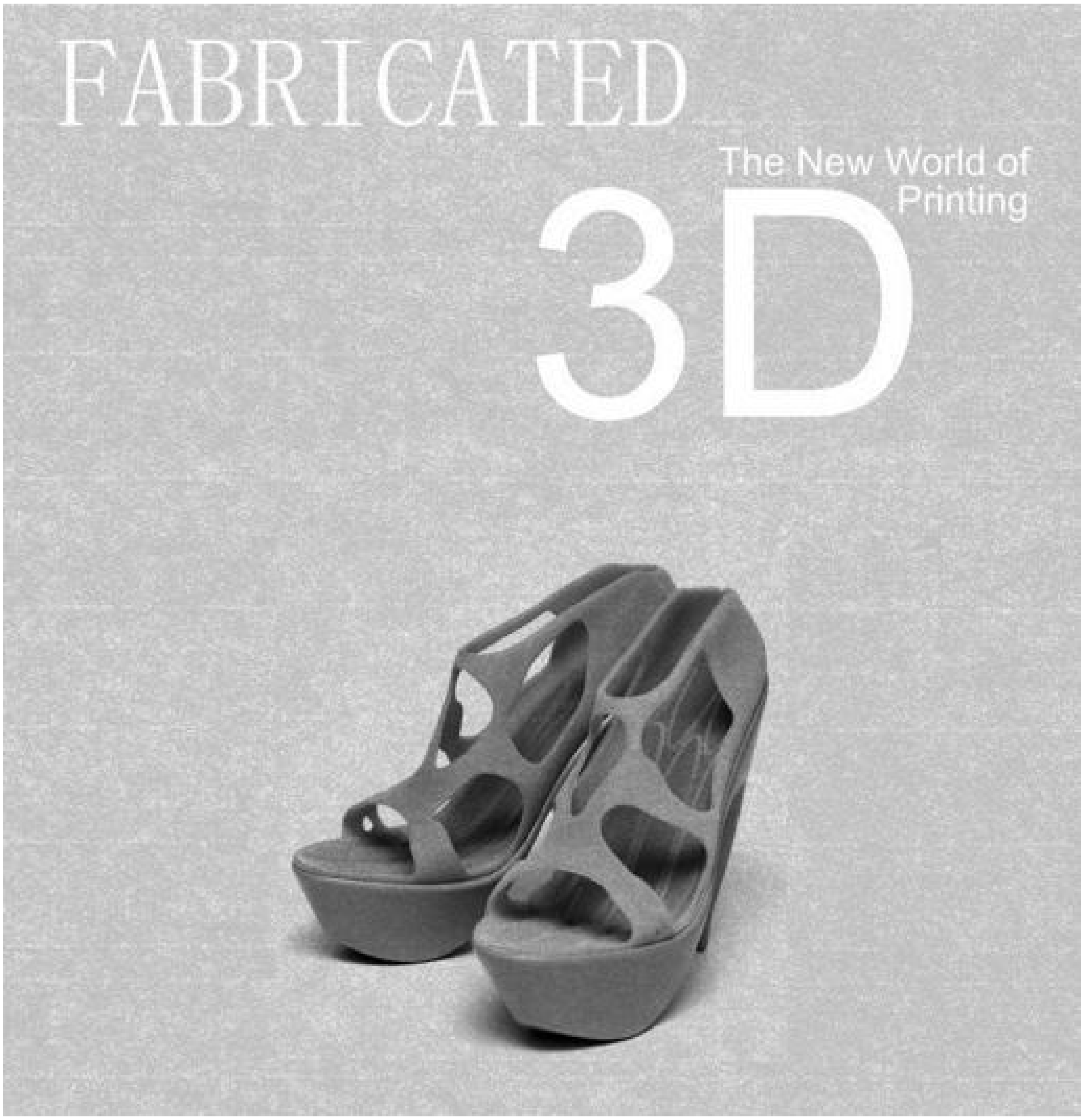
两位作者合著一本书，这既是一大幸事，也是一个难题。没有什么经历比得上在艰苦和孤独的写作过程中有一个同路人相伴了，在这个世界上没有什么人愿意花费数小时如此热切地讨论和剖析晦涩难懂的想法。但是，一本书有两位作者，这就出现了一个挑战：如何处理两种创作风格？

两位作者应该将个人经验和见解整合成一种集体的“我们”，还是应该用各自的名字（例如，梅尔芭或胡迪）区分每个人的思想和经验？经过一番思考和修改，我们决定这样处理：新见解指“我们”的新见解，个人过去的经验指“我”过去的经验，但是在章节中，我们不区分“我是谁”。因此，有时候，“我”是胡迪；有时候，“我”是梅尔芭。

在写这本书时，我们有幸采访到了来自世界各地不同领域的20多位专家。他们兴奋地谈论这一话题，富有感染力，他们还针对很多章节给予了宝贵的反馈。在此，我们想对他们所付出的时间和耐心表示衷心的感谢。事实上，他们创造性的劳动正在改变我们熟知的世界。

希望你们喜欢这本书。

第1章　这是科幻吗，不，它将成为现实



地点：你的生活空间。

时间：从现在到几十年后。

即使将来，早上起床仍然是件难受的事。

刚出炉的全麦蓝莓松饼的香味从厨房食品打印机里飘出。制作有机低糖松饼的“墨盒”在市场被作为奢侈品销售。配方由各有所长的面包技师提供，技师们来自著名的饭店和度假酒店。

当你第一次向你爷爷展示食品打印机时，他认为是自动蛋糕机—20世纪80年代起风靡厨房的美食家电。他不明白，为什么直到他结婚纪念日当天，你才想起要打印加工食品。为了庆祝这一纪念日，你不惜代价

准备了豪华食品“墨盒”，为他和你奶奶打印庆祝晚餐，包括新鲜的金枪鱼排、蒸粗麦粉和每片图案都不同的螺旋形巧克力—摩卡—树莓奶油蛋糕。

健康保险公司将你的食品打印机升级到高级医疗模式以后，你的控制血糖的饮食管理变得更容易了。专门为糖尿病患者推出的新医疗级食品打印机通过一个微型皮肤植入物监测你的血糖并读取无线信号流。当你早上醒来时，食物快速成型机接收到早上第一个读数，然后对你的数字化早餐的含糖量进行相应调整，以保持营养均衡。

早餐后，该浏览新闻了。头条新闻是关于救援被困井下一周的几名矿工的最新进展。他们所在的矿井坍塌，将他们埋在了地下。首支救援队试图将他们救出，但救援工具差点儿引发了一场致命的瓦砾崩塌。

幸运的是，采矿公司遵守了联邦安全法规，并给矿工配备了规范的安全装备。3D安全打印机是一个标准的工具，矿工将其随身携带到矿井深处。在他们下井前，技术人员会确保每台打印机的关键零部件都有更新的设计文件。3D安全打印机与其他机械被带到矿井深处，以备部件断裂后可以迅速更换。

今天，关于矿难的追踪报道称，便携式3D安全打印机居然成为救灾英雄，这真是匪夷所思。一连好几天，被困矿工通过时断时续的无线连接与地面上的技术人员保持通话。两班人马（一个在地上，一个在地下）正在共同努力，优化打印机需更换部分的设计蓝图。这应该是一个短暂、标准的救援行动，现在却变得复杂起来。打印一些更换部件本来是很容易的。救援工作被推迟的原因在于：矿井内的湿度高得出乎意料，损坏的部件被更换后发生了弯曲。

好消息是，矿井的情况今天看起来更乐观。记者解释说，第三次尝试打印的更换部件在矿业公司总部通过了模拟条件下的压力测试。今天，矿工将在地下按更新的设计蓝图打印。如果奏效，今晚就可以开始修复损坏的机器。

当你离开家去工作，起重机和形单影只的施工人员在街对面的一块空地上默默劳作。你邻居的建设项目成为邻里的谈资。几个星期前，他推倒老式的木房子，要建造一幢新的生态友好型豪宅。

邻居在邮箱边向你挥手，还给你看了他的房屋介绍。新家是一家名为“泡沫之家”的公司开发的一个豪华模型，两个多星期就可以完工。该公司的产品目录称，每所房屋的墙壁均内置气象传感器，屋顶在最后完工后，将在顶部安装太阳能电池板，墙壁的配线和铜管已经就位。

你和邻居一起看工程起重机在新的地基上慢慢操作一个巨大的喷嘴。喷嘴扫描景观，依据设计蓝图，挤出混凝土和一些合成建筑材料。

施工人员的职责是确保施工期间工地上没有人走动。装备的“大脑”是一台小型计算机，在施工过程中指挥工程起重机。

邻居一直以极大的兴趣关注着施工进程，看着房子的墙壁慢慢成形。想起一个关于早期工厂自动化老掉牙的笑话：“在那个时代，你要运作一家工厂，一个男人和一条狗足矣。男人负责喂狗，如果这个男人试图碰任何东西，狗就咬他。”

到目前为止，慢慢成形的房子看起来非常漂亮，墙壁呈曲线形，装饰有几何图案、柔和的曲线和镂空。没有人能够建造有这样构架的房子，不管有多少人参与施工。目前还没有人看到新房子的内部构造，但听说你的邻居定制了设计内壁，让它看起来很像老式的砖混结构。

最后，你到了办公室，着手处理数月以来在你的领导下进行的长期调查工作的最终阶段的细节部分。你的团队被安排进行一项新型的低价更换人体器官的黑市调查。越来越多的急需更换器官的患者从未经认证的生物打印医疗服务机构购买更换器官。在公众的头脑中，生物打印人体器官仍然是一个有争议的话题，比你爷爷那一代的人体干细胞、人工流产或克隆呈现出更明显的两极化。

获得更换的器官变得太容易了。高分辨率的全身扫描的成本在过去几年大幅下降。人们乐于在20多岁储存人体器官并保存相关数据，万一出了问题，他们可以快速更换器官。有时候，他们的关节会出一点儿毛病。现实生活中，“人体设计文件”最常用于整容手术，重新找回光滑紧致的皮肤和年轻的身体。

生物打印是没有问题的。事实上，大多数人认为，生物打印是一项挽救生命的技术。我们面临的挑战是怎样整治这些日益繁荣的黑市。对全新的打印器官的生产进行规范是很难的，因为生物打印的成本已经大幅下降。每年，医院和外科诊所都会卖掉过时的生物打印机，去年，黑市商人以不到一辆新车的价格抢购了一台。

在调查过程中，你会了解到大部分黑市机构实际上运作得很好。问题出在错误的设计文件，或者不负责任的器官厂商偷工减料，不在无菌的打印环境下操作。最近的一个案例是，一些病人死于未经认证的“低能器官”，这些病人购买这些器官是为了提高他们的运动能力并改善自己的外貌，他们的家人对到底该起诉谁感到迷茫：无良制造商、生物“墨盒”供应商、器官设计师，还是设计认证商？

从那些本意善良的、想要当医治者的人到那些利欲熏心的无良血肉贩子，他们都属于黑市生物打印商的范畴。有能力的黑市商人能够帮助病人以低价获取重要的新器官，因此被一些人称为“英雄”。其他一些人则痛斥器官商人出售给患者重要器官时唯利是图，尤其是在新打印器官

属于粗制滥造之作的情况下。

在结束一天的工作后，你顺便去了一趟女儿就读的中学。你是今年一个科学展的家长发起人。你女儿的老师告诉你，3D打印机正在破坏科学展的文化。懒惰的学生几乎不费吹灰之力、无须任何技巧就能够通过3D打印制造复杂的物品—他们需要的只是一个良好的设计文件。许多家境贫寒的学生没有家用3D打印机，因此他们无法进行设计实践，而设计实践是他们参与公平竞争所必需的。

还有另一种扭曲。老师解释说，今年的科学展，家长要做清理服务。去年科学展后，学校的保洁员抱怨健身房地板上散落着很多杂乱无章的打印碎片。更糟的是，几天后，学生和教师被几十个鼠标大小的成品机器人绊倒，这些机器人在学校的走廊上叮当翻滚。一些打印机器人存储了预编程的入门知识，另一些可移动机器人似乎已经掌握了一些未经授权的、丰富多彩的智慧。

你和你女儿回到家后，你的爱人分享了好消息：他的3D制造企业刚刚获准进入航空航天云制造网络。云制造是一种取代大规模生产的新的生产方式，它像云计算一样，是一个分散式和大规模批量式并行的生产模式。大企业从几个经审查合格的小制造企业生产网络订购所需的部件和服务，这些小制造企业可以联手制造专门的部件。

云制造正迅速应用于电子、医疗和航空航天等行业，这些行业的企业需要复杂的、高精密度的而不是大批量的部件。小制造企业形成的云制造网络为大企业节省了费用。云制造网络往往靠近客户，这样打印部件的运输距离就缩短了。这些企业将产品部件的设计进行数字存储，每次只生产一个或者几个部件。云制造网络在区域经济中已经无处不在，这样，专门的小型制造商和服务商就创造了当地的就业机会。

你爱人的企业是由数家小制造企业组成的云制造网络中的一员，为军用和商用飞机制造商制造专业燃料喷射器。为了获准进入这个专门网络，他的企业必须证明具有在指定时间内通过3D打印生产飞机部件的制造能力。制造网络对这些部件样品进行抽样压力测试，测试结果还不错。经过一番利润率和制造能力的谈判，他的企业获准进入了该网络。

最后，一天终于落幕。你儿子喜欢在他就寝前刷牙，然后躺在床上听你给他讲故事。今晚你会发现，其他都像往常一样，但他的牙刷莫名其妙地消失了。他觉得可能是昨天落在他朋友家了。你可以跑到商店给他买一把新牙刷，但现在有一个更简单的方法。

你启动家用Fabber[(1)]，让你儿子快速查看几种不同的牙刷设计。几家不同的公司在Fabber网站上出售他们的设计，你儿子已经想好他想要的

品牌—通过讨价还价以99美分买了下来，他喜欢牙刷柄上有几种不同的卡通人物。你在网上付款，通过将小魔杖载入Fabber，扫描了你儿子的指标—手的大小和嘴张开时的形状。

然后，Fabber开始打印。在其发光屏幕上，设计参数表像电影那样滚动—从牙刷程序的设计者到拥有卡通设计版权的公司。新牙刷可以在15分钟内制作完成。

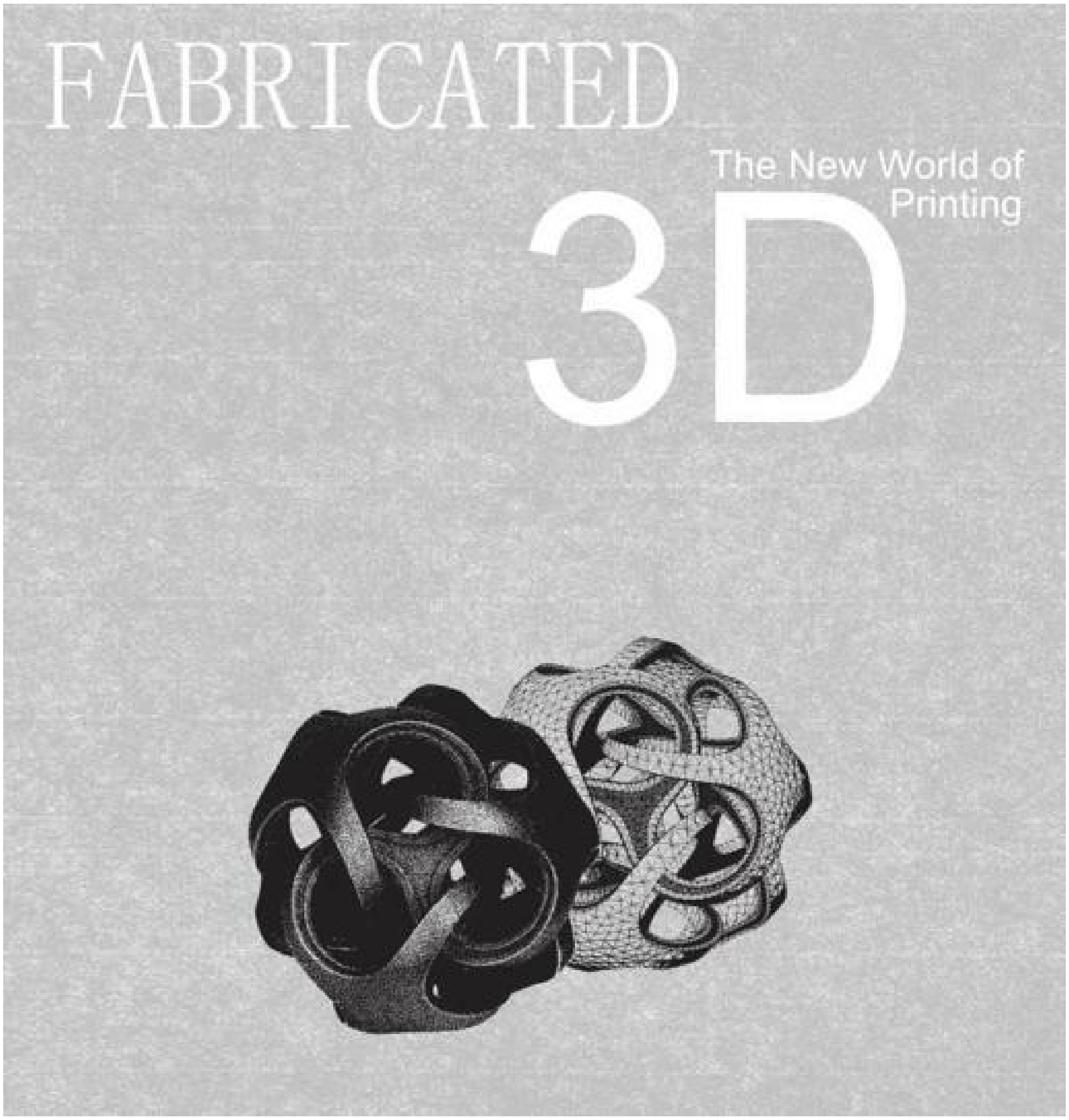
在Fabber打印过程中，你给儿子讲睡前故事。这是关于过去的日子，那些“当我在你这个年龄时”的故事之一。他将信将疑，很难相信你年轻时，每把牙刷看起来都是一样的。现在，如果你从互联网上订购东西，仅需要24小时就可以送货上门。

“哇！”他礼貌地说，“那么要是回到过去，生活一定很不容易啊！”

【注释】

(1)Fabber，一种免费的开源的快速成型机的名字。——译者注

第2章　一台几乎可造万物的机器



如果你有一台可造万物的机器，你会用它做什么？在英国，技术人员通过扫描奥运短跑运动员的脚和脚踝，把数据输入计算机，计算机经过几步简单的计算后，技术人员就能够3D打印出专属每个运动员的新鞋，这双鞋符合运动员的体形、体重、步态和偏好。

在世界的另一端，美国国家航空航天局在亚利桑那州的沙漠中测试了一艘火星飞船，飞船甲板上装有定制的3D打印金属部件。这些部件大多形状复杂，有许多曲线和镂空，除了3D打印机，其他任何设备都生产不出来。

在日本，一位准妈妈想要纪念其首次超声波检测，她的医生编辑她

的超声图像，并3D打印出栩栩如生的胎儿模型。结果，一个透明硬塑料块中就出现了一个前卫的3D打印微小胎儿塑料模型。

这些制造奇迹不断发生。在不远的将来，人们将3D打印出活体组织、富含营养的食品及完全组装好的电子元件成品。本书旨在讲述一种全新的产品生产模式，在下面的章节中，我们将用简练的语言解释3D打印技术及其设计工具。对于一些爱好技术的读者，我们有几章会深入描绘3D打印技术的现状和未来。然后，我们还探讨了其对下游经济、个人和环境的影响。

3D打印开辟了新的前沿领域。随着普通民众也能够设计和生产电动工具，制造业和商业模式将发生巨大变革，知识产权法将彻底失效。

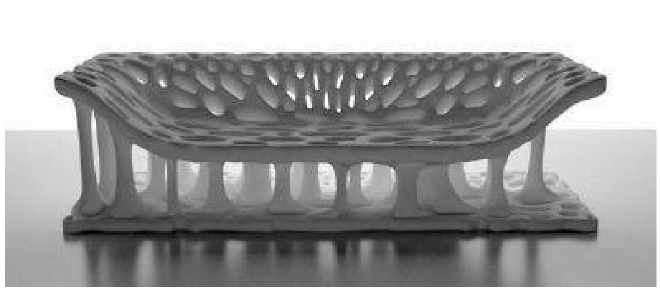


图2–1　用石质材料打印的全尺寸长凳

图片来源：Andrea Morgante and Enrico Dini, D-Shape

有些人清楚地记得自己是在什么地方观看的人类首次登月，还有些人对柏林墙轰然倒塌后几周里的混乱状况记忆犹新，我却记得我第一次听到3D打印时的情景。

那是20世纪80年代末在一场乏味的制造工程研讨会上。教室里很暖和，不幸的是教授的声音低沉、单调而舒缓，我和同学们昏昏欲睡。

教室的门“砰”的一声打开，打破了这个下午讲座上昏昏欲睡的平静。一名陌生男子冲进了教室，这位奇怪的闯入者声称他是库比特系统公司（Cubital Systems）的推销员。我们以前从来没有听说过这家公司，而这家公司却是当时世界上仅有的销售3D打印机的两家公司之一。

这名顶着一头乱发的推销员不断地晃动着一个塑料物体，并声称一场制造业革命正在酝酿之中。“我手里握着制造业的未来！”他大声叫道，“这个塑料物体是由一种能够‘打印’塑料的激光打印出来的。”

出于好奇，我和同学们凑过去想知道他为什么会来我们班上。我们的教授察觉到了我们的兴趣，明智地将课堂交给了这位活跃的闯入者。后来我们才知道，库比特推销员是我们教授邀请的客座讲师。

真是一个喜欢炫耀的人，他一本正经地顿了一下，欣赏着我们的困惑。在安静之后，他让一个学生转动塑料物体露出的曲柄。当同学使劲

转动曲柄时，我能听到课堂上钟表的清脆“咔哒”声，时间是那么难熬。在设备内部，复杂的链锁齿轮彼此牵引地运转着。

我们昏昏欲睡的大脑挣扎着苏醒过来，我们彼此低声问道：“他刚才是说他用激光打印出了那个东西吗？”我们学的是磨齿齿轮，我们试图弄明白这一意想不到的表演是怎么发生的。



‘Revolutionary’

Machine makes 3-D objects from drawings

By Kathleen Sullivan
American-Statesman Staff

Wedged into the corner of an unused photo lab at the University of Texas is an ungainly machine that can transform a computer drawing into a three-dimensional model at the touch of a button.

Sometime next year, the machine, which was developed by a UT graduate student, will make its way out of the lab and into the commercial arena. It will leave with the blessing of the UT Board of Regents, which Thursday gave an Austin company exclusive licensing rights to the "revolutionary" new technology embodied in the machine.

The licensing pact paves the way for the first transfer of technology from the University of Texas at Austin to a commercial venture.

The company that won the right to market the invention is Nova Automation Corp., whose principal shareholders are an Austin consulting engineer and Nova Graphics International Corp., an Austin-based computer graphics software firm.

The agreement represents a "hard fought" victory for UT's fledgling Center for Technology Development and Transfer, said Meg Wilson, coordinator of the center, which was given life during the last Texas Legislature and got

See Inventor, A11

Staff photo by Ralph Barrera
Associate Professor Joe Beaman shows some three-dimensional plastic models made by the 'selective laser centering' device developed by Carl Deckard, left.

图2–2　得克萨斯大学卡尔·德卡德和约瑟夫·比曼发明的第一台选择性激光烧结打印机（约1986年）

图片来源：Carl Deckard and Joe Beaman

当推销员曝出另一条爆炸性消息时，我们变得更加困惑了。他说：“你们这里所看到的所有齿轮、把手、旋钮都不是组装出来的，它

们都是按照一个个单独的、预装配的不同部件一起有序打印出来的。”

当这位精力充沛的闯入者要愉快地结束他的演讲时，教室里混乱的“嗡嗡”声变得越来越大，他甩出了最后的数据观点：一台计算机，而不是一个人，可以在整个生产过程中充当一双“手”操控这台神奇的机器。推销员翻遍了他的包，掏出一张纸，在我们面前挥动了几下。这张纸上显示的是一台计算机的照片，计算机屏幕上是与刚才他向我们展示的塑料物体相同的设计文件。

库比特系统公司推销员笑着问我们是否有问题要问，我们都精神起来，争先恐后地向他发问。他说他用激光“打印”出了所有的塑料部件，这是什么意思呢？什么样的制造设备能够将部件一次性生产出来，而不需要进行组装呢？它能打印塑料以外的其他材料吗？还有，当然了，个人购买这样一台设备要花多少钱？

传统制造感觉瞬间过时。

我仍然记得那一天，这位客座讲师的热情演说使我确信，这种神奇的设备确实会引发一场产品制造和设计的革命。我从来没有见过物体的软件设计（我当时刚刚迷上设计软件，而且兴趣越来越浓）与其实体表现之间联系如此紧密。

那一天是20年前，我们预料的革命没有如期迅速爆发。几年后，库比特系统公司停业了。如同许多开创性技术一样，库比特系统公司的3D打印工艺过于复杂和低效，机器设备昂贵，利润率敏感的制造企业难以接受。

我有时想知道库比特系统公司关门后，那位推销员去了哪里。他的推销说辞毫无修饰，却能直达目标。普通民众能够像编辑数码照片一样毫不费力地撕裂、混合并打造实体物体，这只是时间问题。

打印三维物体：哈利·波特的魔杖复活了

如同童话故事里的魔杖，3D打印能让我们掌控物理世界。3D打印赋予了普通人强大新颖的设计和生产工具，人们可以获得专业设计师和制造业大企业所独有的设计和制造能力。

在未来的3D打印世界里，无论何时何地，人们需要什么就可以打印什么。当然，技术虽然好，也要看人们怎样应用。有人可能会用来制造武器或不受监管甚至有毒的新药。我们的环境也可能很快被满足各种需求的打印塑料产品垃圾所充斥。生物打印带来的伦理挑战将比干细胞引发的争议更复杂。黑市商人则会受到利益驱使，通过制造和销售有故障的机器零件来快速赚取黑心利润，那些豆腐渣工程在关键时刻往往会出问题。

大多数人第一次听到3D打印时，他们就想到了那些老式的、常见的桌面打印机。喷墨打印机和3D打印机最大的区别是维度问题，桌面打印机是二维打印的，在平面纸张上喷涂彩色墨水，而3D打印机可以制造拿在手上的三维物体。

3D打印机依据计算机指令，通过层层堆积原材料制造产品。在人类历史的大部分时间里，我们通过切割原料或通过模具成型制造新的实体物品。

3D打印的技术名称是“增材制造”，这是对实际打印过程比较贴切的描述。3D打印独特的制造技术让我们能够生产前所未有的各种形状的物品。

3D打印不是一种新技术，3D打印机已在制造机加工车间默默地工作了几十年。在过去的几年里，由于受到计算能力、新型设计软件、新材料、创新推动及互联网进步的推动，3D打印技术发展迅速。

计算机在3D打印过程中发挥关键作用，没有计算机发出的指令，3D打印机就会瘫痪。3D打印机正常运作的前提是要输入一个设计好的电子蓝图或设计文件，它们负责告诉3D打印机在哪里放置原材料。事实上，没有连接计算机及设计文件的3D打印机是没有用处的，就像没有存储音乐的iPod。

3D打印过程如下：3D打印机在设计文件指令的导引下，先喷出固体粉末或熔融的液态材料，使其固化为一个特殊的平面薄层。第一层固化后，3D打印机打印头返回，在第一层外部形成另一薄层。第二层固化后，打印头再次返回，并在第二层外部形成另一薄层。如此往复，最终薄层累积成为三维物体。

3D打印机不像传统制造机器那样通过切割或模具塑造制造物品。通过层层堆积形成实体物品的方法从物理的角度扩大了数字概念的范围。对于要求具有精确的内部凹陷或互锁部分的形状设计， 3D打印机是首选的加工设备，它可以将这样的设计在实体世界中实现。



图2–3　这台打印机价值约10 000美元，大小与微波炉相当

图片来源：Stratasys Inc.

3D打印部件和产品正在蔓延到日常生活中。你的汽车仪表盘的设计就借助了3D打印原型，确保各部件紧密地配合在一起。如果你戴助听器，　3D打印可以使用光学扫描数据，捕捉你内耳的精确形状，实现定制生产。

牙科诊所借助X射线不到一个小时就可以打印定制的牙冠。在体内安装用钛和陶瓷打印的假膝盖已经风靡世界。如果你有幸乘坐波音公司的新型飞机—波音787梦想飞机，你已经将生命托付给至少32种3D打印的部件。

3D打印技术的秘密可以概括如下：就将复杂设计变成实体物品而言，3D打印机比其他生产模式（如人工生产或机器生产）更精确、更通用，可以将一个复杂的设计通过组合不同的原材料以过去不可能的方式制造成实物。

如今，一般家用3D打印机可以制造鞋盒大小的塑料物品。工业领域的3D打印机可以制造大到汽车、小到肉眼几乎无法看到的针头等物品。有些研究人员开始尝试用3D打印机打印小型房屋大小的混凝土结构。而在微观的角度，另外一些研究人员已经打印出肉眼几乎看不到细节的物体。

走向数字化和模拟化：跨越虚拟世界和实体世界的鸿沟

20世纪90年代中期，电子商务和数字媒体还处于起步阶段。在充满奇妙预测的1995年畅销书《数字化生存》（*Being Digital*）中，作者尼古拉斯·尼葛洛庞帝预测道："娱乐原子"正在消亡。在数字媒体粉墨登场的几年前，尼葛洛庞帝准确预测了娱乐传媒的实体形态（传统的图书出版、光碟租赁和大型电视网络）将面临与恐龙同样的命运。

集中控制的大众媒体和图书出版的消亡只是开始。20世纪末，信息开始走向数字化。21世纪，虚拟世界将与实体世界更紧密地联系在一起。

虚拟世界是一个可以在其中自由选择的地方。在视频游戏里，人物可以跨越建筑物、长出新的手臂、变身成为不同的实体形状。虚拟世界也很容易编辑和修订。虽然改变一棵真树的树皮颜色是不可能的事，但在数码照片中改变树的颜色却很简单。虚拟世界的行为可以被编程。如果实体对象的详细信息可以通过设计文件捕捉，设计的数字"原料"就可以模块化，由屏幕上微小的离散光点或像素构成。

3D打印技术将跨越虚拟世界与实体世界的鸿沟。当然，怀疑论者会立即指出，数字世界和实体世界已经有了一些交汇点。毕竟设计和制造工艺已经由计算机驱动了数十年，现在大规模生产几乎实现了完全自动化（除了最后一步，即劳动密集型装配流水线）。

虚拟世界和实体世界的融合将是一个缓慢而微妙的过程，这一过程具有阶段性。首先，我们要获取实体物品的形状；其次，我们上升到新阶段，控制其材料组成；最后，我们要控制实体物品的行为。

掌控产品形状：现实生活中不可能的形状也能制造

3D打印机可以详细阐释数字化设计文件，带我们到接近充满丰富的创造力和自由的虚拟世界。如果你看动画片，显然，屏幕上的画面就是在用计算机设计的：恐龙在现代化的地铁站里漫步，状如秃鹰的飞行机器战士用致命激光扫射所经之处。

如果影片在动画和现实之间来回切换，对观众来说，在计算机绘制的充满丰富想象的多彩世界和现实生活中显然有一个明确的界限。欣赏3D打印的前景和风险的方法之一是思考掌控材料世界的铁律。由于3D打印机分层形成物品，它们可以塑造过去只有在自然界存在的形状，曲线、镂空与复杂的内腔制造将成为可能。

目前的挑战是原子以不可预知的方式走到了一起。数字设计在计算机屏幕上令人震惊，但理论上被制造出来后随时会坍塌，因为它不能突破重力和材料限制。相比之下，数字世界让我们放飞想象的翅膀，自由创造。数字世界急需制造出现实生活中不可能的形态。

控制材料构成：实体物品能不能也变成数字世界的"1"和"0"

在融合的第二阶段，3D打印会给我们带来对物质构成和材料构成的精确控制。多材料3D打印机将为新产品的生产打开大门，这种新产品由严格控制的原材料构成，其整体性能将大于部分之和。

试想在一个水彩调色盘中，将蓝色和黄色混合，可以形成无数深浅不同的绿色。在自然界中，22种氨基酸以不同的方式组合，创造出可以形成惊人物种的蛋白质。配备精确的设计文件的多材料3D打印机，可以将熟悉的原材料混合成全新的组合。

随着3D打印技术的不断发展，我们将看到很多由当前不可行的材料混合制成的物体。我们将看到可以自我修复的机器部件，或者看到可以将其长度延伸近10倍的无线网格。医疗设备将对特定病人的血型做出回应，或检测其体温变化。

控制材料组成的第二个渠道与第一个稍有不同。有一天3D打印机会制造出可控的材料。在虚拟世界中，所有的信息无论多么复杂，最终都可归结为它的本质，那就是两个基本单位：1或0。

相反，实体物品由丰富的、非模块化的螺旋结构的原材料制成，它的基本单位是原子，不那么规则且难以控制。由于材料在实体世界具有多样性，很难有意义地捕捉数字形式的“模拟”材料。结果是，模拟材料很难被精确地复制、控制和编程。

不兼容的原子是制造商的噩梦。诚然，3D打印机不能粉碎开放的原子，使它们更具可塑性。但是，3D打印机可以做的是将一度不能兼容的原材料巧妙地结合在一起，打印成单一的物品。

电子电路一直都臭名昭著，因为人们必须先单独制造出内部的陶瓷和塑料零件，然后加以组装，才能形成电子电路的金属部件。事实是，制作电路关键部件的原材料必须通过单独的制造机器生产出来，这决定了电路板是平坦的，由多个薄层构成。

如果电子电路的组件不受制于彼此不兼容的影响，我们可以创造出各种形状和样式的电路。如果我们能将导电和非导电材料组装在3D打印机里，我们可以制造出各种形状和大小的电路。我们可以打印内置电路的机械装置，这些装置和生物世界一样复杂。

实现对材料组成控制的另一种方式是体素化。体素是等效的实体像素，它可以是微小的、固体材料的碎片，也可能是微小的容器，可以容纳你放入的任何东西。

我们正在了解由体素制成的3D打印物品。由体素制成的物品可以替代构成大多数实体材料的模拟材料。如果你用体素制造物品，你就离像可编程物品一样制造物品更近了一步。控制实体物品的材料组成打开了通往下一阶段（即控制实体物品行为）的大门。



图2–4

注：多材料3D打印技术尚处于早期发展阶段。这个玩具实际上是一个复杂的加工产品，它由几种不同原材料制成，这些材料在打印过程中被混合在一起。

图片来源：Objet Inc.

打印智能物品：机器人将过时

拿厨房的木桌为例，如果你用光学扫描仪扫描它的外表面，你可以把扫描获得的数据转换成设计文件。一旦将桌子的实体尺寸转换成数字格式，就可以轻易使用设计软件暂时获得对桌子设计的控制。

你可以先编辑桌子的设计文件，然后3D打印出一张新桌子。然而，除非你用数十亿个体素进行打印，否则新桌子将是模拟的。它的材料、它的部件和组片将仍然是原生的、非智能的、连续的和被动的。如果你能用体素3D打印出新桌子，那么新的世界可能就会出现。

随着电子元件的尺寸继续缩小，计算能力不断提高，总有一天我们能够3D打印出含有微小电路的体素。就像图形的像素，其完美的集合会创建优美的高分辨率的数字图像一样，完美的体素集合可以制造智能的、有活力的实体物品。

体素催生出活跃的智能原材料。与今天我们能3D打印的非智能部件不同，未来我们能打印出智能系统，例如一部可使用的手机。3D打印机将创造出智能面料、现成机器人的生命形式和能够学习、响应和思考的机器。我们可以打印带有数字智能内涵的实体物品。

未来有一天，3D打印将把人工智能从计算机拓展到现实世界，机器

人将成为过去时。半机器人在20世纪90年代就成为文化遗迹，未来取决于可以编程的物质以及本质可以编程并可以被3D打印的原材料。

麻省理工学院教授尼尔·格申费尔德在《当鞋子开始思考》（*When Things Start to Think*）一书中预言，可编程物质有自己的思想。数字处理能力将真正地找到自己的腿，走进物质世界。3D打印可编程物质将形成自己的实体，具备机械和触觉能力。

也许有一天，3D打印机器人的生命形态会被具有电池、传感器和电路大脑的3D打印机打印出来。新生的3D打印机器人将从打印台上迈出不太稳当的第一步，并让自身的电路学习周围的运行方式。也许有一天3D打印机器人会使用它们的3D打印机发明新功能，给它们的“生育机器”做体检来校验或替换打印部件。

“请把我的鞋子传真过来”：3D打印机能做到

当我们毫不费力地对实体和虚拟形态进行移形，并且实体物品顺利地在比特和原子间转换时，最终的融合就到来了。在线文档也可以以同样的方式打印在纸上、扫描然后再打印，总有一天实体物品会转换为比特和原子然后再转换回来。

在《数字化生存》一书中，尼葛洛庞帝提到，实体世界不容易转换成数字格式。原子很重，运费较高。实体存储占用空间。原子按照预先定义的方式牢牢结合在一起。

尼葛洛庞帝写道：“如果你制作毛衣或中餐，我们将它们转换成比特需要很长的时间。‘将我传上去，斯科蒂！’虽然这是一个美好的梦想，但几个世纪内都不可能成真。在此之前你只能依赖联邦快递、自行车、运动鞋将你的原子从一个地方运到另一个地方。”

可能有一天，3D打印机会成为最重要的传真机。如果虚拟世界和实体世界真的不相互排斥，我们可以毫不费力地将物品从一个地方传到另一个地方。几年前我还是研究生时，我的几个同事就在认真研究如何做到这一点，他们研发光学扫描技术并测试这些技术在原始的3D打印机上的精度。

我很佩服他们的想象力，即使在今天看来，它仍然是未来数十年的事情。不过，据我所知，他们未能在核心挑战方面取得突破：首先，光学扫描只能获取拍摄对象的表面细节，大多数对象都有重要的内部结构；其次，他们只能打印由单一材料制成的简单的无生命物体。

现在，我们可以“传真”简单的实体物品。我曾和一个同事（考古学教授）一起开展一个研究项目，他从事几千年前楔形文字的译解研究。为了开展研究，他经常前往中东各国的考古遗址。

最近我的这位同事从国外归来，一直为不能将珍贵信息带回家困扰。古楔形文字是宝贵文物，发现者会及时交给所在国政府。考古学家们试图通过拍照或精心刻画字符的形状捕捉一些信息，遗憾的是真实的东西不能带回。

我和我的同事决定做一个实验，看看我们能否将宝贵的楔形文字从一个地方传真到另一个地方。我们认为可以用CT扫描他收集的几个楔形文字，然后将扫描数据转换成设计文件，并通过3D打印机创建楔形文字的副本。

我们认为如果实验成功，下次我同事去国外时可以说服地方当局让他用CT扫描当地的宝贵文物，然后他可以将设计信息发送到附近（或远处）的3D打印机上与其他人分享。他可以为文物所属国家提供宝贵的保存服务，因为他们也可以存储楔形文字CT扫描件和3D打印副本的数据。

我们发现，“传真”楔形文字相当简单：首先，我们将CT扫描数据转换成设计文件；其次，我们3D打印出楔形文字的不同尺寸、不同材料的复制品。

最重要的是，在楔形文字传真实验过程中我们获得了一个意想不到的收获，即CT扫描可以捕捉楔形文字字样的外部和内部。几百年前，研究人员就已经了解到许多楔形文字以镂空的方式书写，但到现在为止，看到内部结构的唯一方法是打碎（从此就破坏了）它。CT扫描和3D打印楔形文字副本的一个好处是，你可以愉快地将复制品敲碎读出内部书写的内容。



图2–5

注：CT扫描的珍贵文物可以被3D打印，用于保存和教育。左边是楔形文字原件，右边是3D打印副本，下方是放大后的副本。

图片来源：Cornell University. Curator David I. Owen; Design: Natasha Gangjee; Photo

3D打印的十大优势

预测未来是有风险的。写这本书时，我们就3D打印前景采访了一些人，发现了一些即将显现的潜在优势。来自各个行业、具有不同背景和专业技术水平的人用类似的方式描述，3D打印帮助他们减少主要成本、时间和复杂性障碍。

我们将获取的信息归纳为十项优势，希望能帮助一些个人和企业充分利用3D打印技术。

优势1：制造复杂物品不增加成本。就传统制造而言，物体形状越复杂，制造成本越高。对3D打印机而言，制造形状复杂的物品成本不增加，制造一个华丽的形状复杂的物品并不比打印一个简单的方块消耗更多的时间、技能或成本。制造复杂物品而不增加成本将打破传统的定价模式，并改变我们计算制造成本的方式。

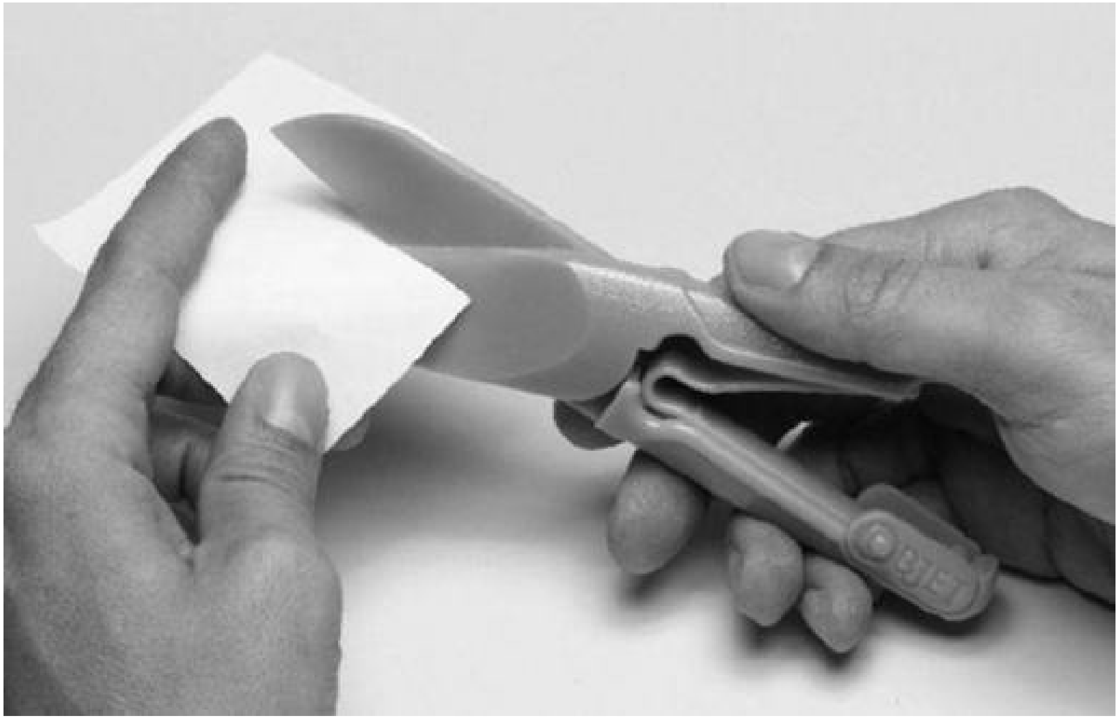


图2–6

注：打印功能部件。3D打印剪刀“开箱即用”，不需要组装或打磨。

优势2：产品多样化不增加成本。一台3D打印机可以打印许多形状，它可以像工匠一样每次都做出不同形状的物品。传统的制造设备功能较少，做出的形状种类有限。3D打印省去了培训机械师或购置新设备的成本，一台3D打印机只需要不同的数字设计蓝图和一批新的原材料。

优势3：无须组装。3D打印能使部件一体化成型。传统的大规模生产建立在组装线基础上，在现代工厂，机器生产出相同的零部件，然后由机器人或工人（甚至跨洲）组装。产品组成部件越多，组装耗费的时间和成本就越多。3D打印机通过分层制造可以同时打印一扇门及上面的配套铰链，不需要组装。省略组装就缩短了供应链，节省在劳动力和运输方面的花费。供应链越短，污染也越少。

优势4：零时间交付。3D打印机可以按需打印。即时生产减少了企业的实物库存，企业可以根据客户订单使用3D打印机制造出特别的或定制的产品满足客户需求，所以新的商业模式将成为可能。如果人们所需的物品按需就近生产，零时间交付式生产能最大限度地减少长途运输的成本。



图2–7

注：图中的部件看起来像组装的砖块，实际上是预先组装3D打印出的塑料制品，一次成型。

图片来源：Printed on ZPrinter 650 courtesy of 3D Systems

优势5：设计空间无限。传统制造技术和工匠制造的产品形状有限，制造形状的能力受制于所使用的工具。例如，传统的木制车床只能制造圆形物品，轧机只能加工用铣刀组装的部件，制模机仅能制造模铸形状。3D打印机可以突破这些局限，开辟巨大的设计空间，甚至可以制作目前可能只存在于自然界的形状。

优势6：零技能制造。传统工匠需要当几年学徒才能掌握所需要的技能。批量生产和计算机控制的制造机器降低了对技能的要求，然而传统的制造机器仍然需要熟练的专业人员进行机器调整和校准。3D打印机从设计文件里获得各种指示，做同样复杂的物品，3D打印机所需要的操作技能比注塑机少。非技能制造开辟了新的商业模式，并能在远程环境或极端情况下为人们提供新的生产方式。

优势7：不占空间、便携制造。就单位生产空间而言，与传统制造机

器相比，3D打印机的制造能力更强。例如，注塑机只能制造比自身小很多的物品，与此相反，3D打印机可以制造和其打印台一样大的物品。3D打印机调试好后，打印设备可以自由移动，打印机可以制造比自身还要大的物品。较高的单位空间生产能力使得3D打印机适合家用或办公使用，因为它们所需的物理空间小。

优势8：减少废弃副产品。与传统的金属制造技术相比，3D打印机制造金属时产生较少的副产品。传统金属加工的浪费量惊人，90%的金属原材料被丢弃在工厂车间里。3D打印制造金属时浪费量减少。随着打印材料的进步，“净成形”制造可能成为更环保的加工方式。



图2–8　这只鞋的钛合金鞋底是3D打印一次成型制造的

图片来源：Kerrie Luft

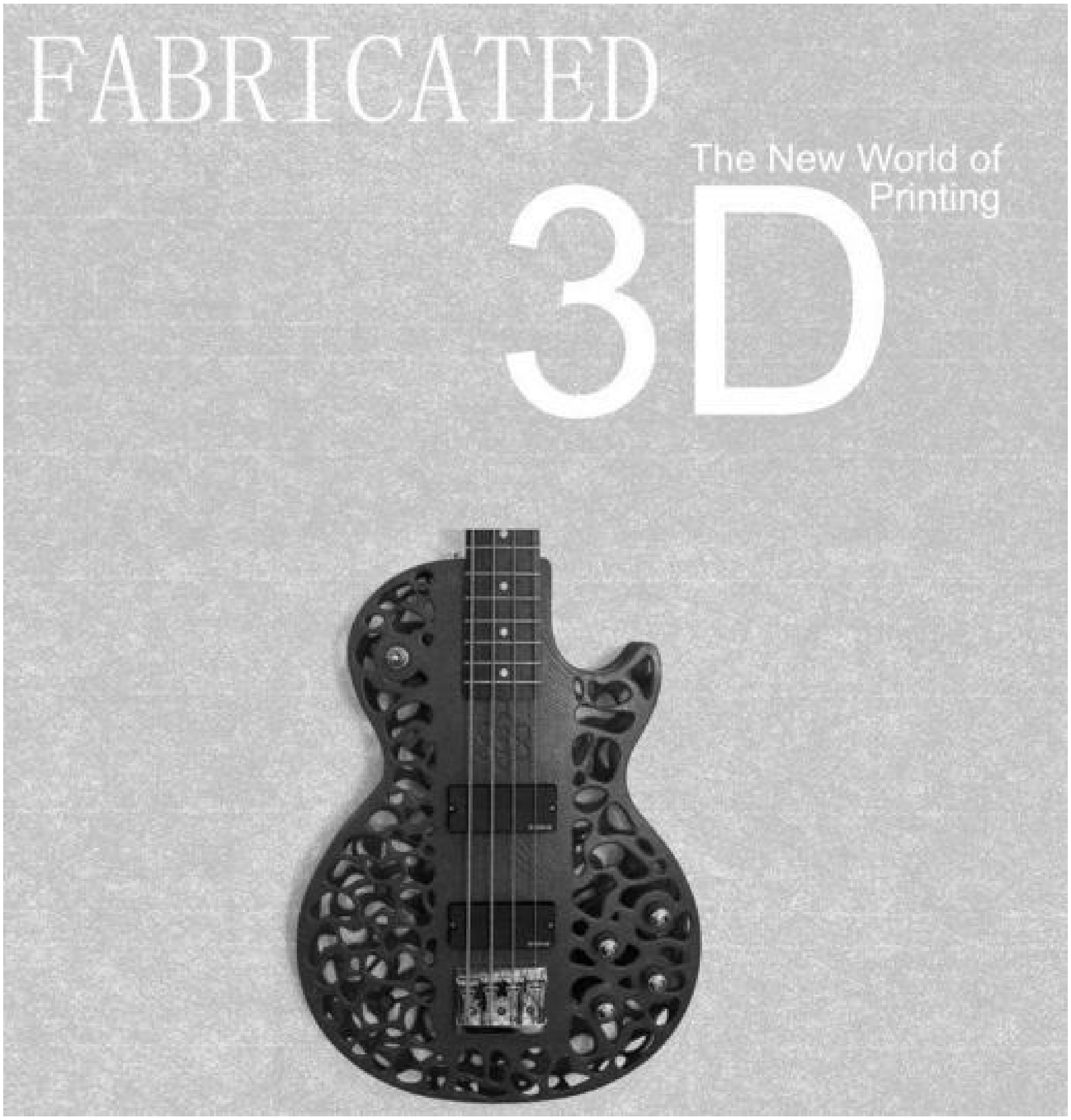
优势9：材料无限组合。对当今的制造机器而言，将不同原材料结合成单一产品是件难事，因为传统的制造机器在切割或模具成型过程中不能轻易地将多种原材料融合在一起。随着多材料3D打印技术的发展，我们有能力将不同原材料融合在一起。以前无法混合的原料混合后将形成新的材料，这些材料色调种类繁多，具有独特的属性或功能。

优势10：精确的实体复制。数字音乐文件可以被无休止地复制，音

频质量并不会下降。未来，3D打印将数字精度扩展到实体世界。扫描技术和3D打印技术将共同提高实体世界和数字世界之间形态转换的分辨率，我们可以扫描、编辑和复制实体对象，创建精确的副本或优化原件。

以上部分优势目前已经得到证实，其他的会在未来的一二十年（或三十年）成为现实。3D打印突破了原来熟悉的历史悠久的传统制造限制，为以后的创新提供了舞台。在以下的章节中，我们将探讨3D打印技术如何改变我们的工作、饮食、医疗、学习、创新和娱乐。首先，让我们走进制造和设计的世界，在那里3D打印技术削弱了规模经济的铁律。

第3章　敏捷制造：既好，又快，还省



在我常去的汽车修理店的收银处有一个标签，上面写着："我们可以为你做得又好、又快或者又便宜。请选择其中任意两个。"这句玩笑话真是言简意赅。但是，如果汽车修理店是错的又会怎么样？

在地球的另一边，一家遥远的牙刷厂生产儿童牙刷，售价10美分。这家工厂采用先进的生产设备并且雇用高级技术人员。这听起来不错，像是高品质的配置。工厂每天的牙刷产量在30万把以上，生产速度很快。

难道是汽车修理店错了么？也许你可以把它又好、又快、又便宜地修好，没有必要舍弃其中之一。但也许汽车修理店没有错，我们第一眼

所见仅仅是冰山一角。

大规模生产往往涉及隐性成本，还可能延迟交货。如果你从企业全局的角度考虑而不是从消费者的角度考虑，大规模生产成本并不低。将设计概念转化为大规模生产的产品，这一过程也不是特别快。如果你想要的并不是万金油似的各种场合都可以使用的产品，那么大规模生产的产品也不是特别好。

小批量地大规模生产？矛盾！销售给消费者的最终产品价格越低，对企业来说批量销售就越重要。这就是为什么牙刷厂为了收回小批量生产的投资，大批量销售其大规模生产的产品，最小的订购量高达28 000把牙刷。

另一个隐性成本是产品的设计过程。工厂的生产是残忍的，将设计概念转换成可以大规模生产并获得收益的难度与将一部复杂的小说改编成电影差不多。即使是一把简单的塑料牙刷的设计（在计算机上看起来很好），在塑料成型过程中承受工业强度的压力时，结果也难以预测。经济规律同样无情，新的设计理念被迫在产品质量和制造成本之间进行权衡。

工厂和生产线是大规模生产相同产品的理想方式。然而，这样生产的成本并不低，甚至简单的塑料制品大规模生产的背后也存在很多看不到的成本。企业必须雇用技术精湛的技术人员和工程师，准确地将设计转变为实际的产品，校准工厂的机器和监督装配生产线。

想又好又快地生产产品，又想压低制造成本，这是一个困境，核心在于被称为“规模经济”的基本经济规律。规模经济是支持现代工业经济的无形力量，是使大规模生产有利可图的经济规律。

规模经济在降低大规模生产产品消费价格的同时增加了企业利润。然而，为了收回前期在设计和生产中的投资，企业必须出售大量相同的产品，只有这样才能从最初的投资中获益。

大规模生产极大的隐性成本之一是牺牲产品的多样性。为了获取规模经济收益，企业必须经得住改变产品设计的诱惑，除非有大量的市场机会能够确保投资有利可图。每一次设计的改变，每个小小的升级或变化，都会触及底线。

大规模生产不能同时为企业和消费者提供又好、又快并且便宜的产品，那么工匠生产又会怎样呢？熟练的工匠小批量生产定制的产品—无须装配线也不必投资建设所需要的工厂，工匠也不雇用熟练的设计师、工程师和技术员。如果一个设计概念在制成产品后被证实存在致命的缺陷，工匠可能需要承担材料浪费的成本。然而，由于只生产了一个有缺陷的产品，工匠能够快速调整最初的设计，这就避免了扔掉上百个（或

者上千个）有缺陷的产品所导致的经济损失。工匠生产的缺点是不具规模。



图3–1　注塑机

注：注塑机能够低成本地快速生产塑料部件，但是制造模具不但需要前期投资，还对设计提出了挑战。

图片来源： KenPlas Inc.

兼具大规模生产和手工生产的特征

大规模生产具有高效优势，能够增加企业利润、降低消费价格，然而规模经济也对产品的多样化和定制化产生了负面影响。相反，工匠能轻松生产多样化和定制的产品，但是产出量比较小。3D打印技术提供了一条融大规模生产和手工生产于一体的新途径。

当首次发现鸭嘴兽时，探险家们认为这是一个骗局，以为是一个爱开玩笑的人在一只毛茸茸的动物身上粘贴了鸭子嘴、有蹼的脚和袋鼠的育儿袋。3D打印就是制造业的鸭嘴兽，将精准的数字技术、工厂的可重复性和工匠的设计自由结合在一起。

就像工厂里的机器一样，3D打印机也是自动化的。数字设计文件会简洁地接收生产特定产品的指令，然后为3D打印机的各个步骤提供指导。这个过程可以保存下来或通过电子邮件发送到其他任何地方。

就像工匠能生产多种产品一样，3D打印机具备多种用途。一台打印机可以制造出各种各样的产品，并且无须大量的前期投资。在3D打印机上打印1　000个不同的产品与打印1　000个相同的产品，成本是一样的，定制的成本几乎消失。

尽管具有这些优势，3D打印制造业并不具有规模经济。像任何极端

的个性特征一样，事实上，3D打印未能提供规模经济是其最大的弱点，但同时也是其最大的优势。对于一个靠大生产规模获取边际利润的企业来说，达到规模经济非常重要。然而，如果一家企业的商业模式是销售少量独特的、不断变化的或者定制的、具有高边际收益的产品，那么3D打印产品（像鸭嘴兽）代表了革命性的飞跃。

3D打印和设计技术使得设计与制造更灵活，小企业也能获得之前只能由全球性企业掌握的强大工具。财力雄厚的企业配备一台3D打印机和设计软件，就能够提供此前只有大企业内部的设计和工程部门才能提供的高端服务。

在为创作本书进行研究的过程中，我们了解到，3D打印正在之前的制造地区（纽约州北部和部分中西部地区的经济衰退地区）萌芽。那里的企业员工很多是以前解散的地方制造工厂的工人，当在外包生产和工厂自动化双重冲击下失去工作的时候，这些失业的工人面临着一个艰难的选择：是去其他地方寻找工作，还是留下来设法工作？

过去，没有哪一家小企业能够买得起一台工业用3D打印机和一台强大的、能够运行工业设计软件的计算机。这种情况正在改变。我们参观的一家小公司由一个经历了西部制造业辉煌的人建立，我们叫他“迈克”（这不是他的真名，因为他的家庭不想他们的企业被别人认出）。迈克的公司为当地提供工程设计、快速成型和3D打印服务。

为了了解更多，我们拜访了迈克。开车穿过衰退地区是一种发人深省的体验。在去迈克公司的路上，州际高速公路关闭了，手机服务也停了。当地人已经搬走，只留下空荡荡的城镇，整个城镇在日益萎缩的税收基础上勉强维持。

车窗外是风景如画的乡村景观，起伏的丘陵、破旧的红色谷仓和成群的奶牛。两车道公路穿过不断流失人口的小城镇。我们的头脑中不断思考着“留下来的人们如何谋生”等问题。

经过几个小时的车程，我们到达了迈克公司的总部。迈克在门口迎接我们，把我们领进了地下室的车间和设计工作室。在这个半车间半办公室的地方，这家小公司的总部看起来并没有仓储式生产的嘈杂和规模。房间里灯火通明，几台计算机放置在房间角落的桌子上。靠墙放着一张台球桌，像大多数台球桌一样，上面堆了一些盒子和未使用的产品。

迈克于20世纪70年代初高中毕业，他的第一个老板将他培养为一名制图员。今天，很难相信，制造业曾经是一个繁荣的行业，对于年轻人来说是一个前途光明的行业。曾经，一个人通过在当地制造业企业工作就能获得很好的生活条件。

几十年过去了，迈克被解雇了，这家企业将其制造业外包出去，并将专业人员派到国家的其他地方。大约15年前，迈克和他的家人决定继续留在他们的家乡，尽管由于地区经济的不景气，工作很难找。

因为现在迈克的公司能够实现敏捷制造，类似的小型服务公司能够买得起他们自己的设备和软件。我们问迈克能否看看他制造业务的核心—3D打印机。他带领我们走上一段楼梯，期间我们小心翼翼地不断绕过那些围着我们、在我们脚边嗅来嗅去的狗。在他的客厅里，我们看到了墙角趴着一只懒洋洋打瞌睡的猫。在车库里，一台3D打印机正在等待下一项任务，样子比一台豪华冰箱更高一些，也更宽一些。

迈克告诉我们，3D打印机是使他的公司在客户产品开发过程中提供增值服务的关键设备，是设计者和工程师在现实生活中测试设计理念的高效而精准的生产设备。像迈克指出的："拥有自己的3D打印机是我作为设计工程师实现增值的因素之一。"

迈克解释说他的工作是提供给企业一个"产品不同部分是如何连接在一起的高技能和高精确预测"，拥有一台3D打印机将使它成为可能。当迈克完成产品设计后，他首先用自己的3D打印机测试。设计打印出来以后，需要的话，再修改它。当设计满足他的要求后，他再给客户最终的设计文件。

在我们访问结束时，我们问迈克作为设计工程师，计算机和3D打印机是否改变了他的工作。迈克毫不犹豫地说："绝对的。消费产品的设计过程以前需要1年，现在只需3个月。3D打印机的作用巨大。现在，我们能够为我们的客户生产越来越多的产品。"

更快：从设计到产品交付的时间缩短了

随着我们的世界加速发展，企业越来越渴望缩短它们从设计到产品交付的时间。产品的生产时间是企业效率的关键衡量指标，即设计与完成最终产品之间的时间越短越好。3D打印机通过使设计师和工程师现场低成本、高效地生产产品原型缩短了产品交付时间。

原型是产品的初稿，它有助于设计师、工程师、营销团队和制造商进行多重检查，看一看设计变成最终产品时的外观、感觉如何。3D打印通常为汽车制造商提供产品快速成型服务。

汽车制造商通过使用3D打印机打印出设计理念，并且把它们提交给项目团队，这就节省了时间，甚至节省了消费者的时间。迈克向我们解释了快速成型的过程："我们通常为汽车制造商的市场部门提供我们快速成型产品的照片和汽车部件的实物样本。我们给他们几个用3D打印机打印的部件，而这些用CAD模型很难有直观感受。"

我们访问迈克公司时，他正在设计一个新卡车的原型产品。之前原型产品需要一个内部的、专职的设计团队手工完成，而现在这种情况改变了。一些企业将它们的产品设计工作外包，只留下销售和市场部门。企业在国内生产某些汽车部件就比在国外生产成本低。

3D打印原型将慢慢取代手工泡沫或黏土模型。迈克的客户同时采用了这两种方法，他们雇用技工手工制作汽车部件的泡沫模型，同时使用诸如迈克这样的公司3D打印汽车部件的模型。迈克告诉我们，他的客户要求他先扫描泡沫模型，然后捕捉这些数据形成一个详细的设计文件。“今天我们将要携带扫描仪，还要去他们设计卡车的地方。”他说。

然而，在原型制作之前，无论该原型是手工制作的还是3D打印的，先要由市场和技术部门进行卡车设计。经过几次头脑风暴会议，新卡车的规格与产品定位逐渐清晰，销售人员和工程师将信息提交给设计师，由设计师制作几份详细的、逼真的概念草图。“很多决定都是在事情真正发生之前。”迈克说。



图3–2　3D打印机打印出的实际大小的卡车驾驶室—各部件完整

图片来源： Objet Inc.

一旦新的卡车概念草图获得批准，成型过程就开始了。原型为销售和设计团队提供了卡车各部分空间关系的总体感觉。在卡车的驾驶室里，仪表旋钮、车灯和其他部件的原型能够使产品经理体验到：对未来的消费者来说，这辆卡车的外观和感觉如何。卡车发动机的原型能够帮助机械设计师确保发动机是可以维修的。

以前原型成型是一个周期较长、成本高昂的过程，对于制造商来

说，走捷径或者确信产品设计能够实现都是有风险的。“过去，我们的设计做得非常漂亮，但是当它们完成后，我们又会发现其他问题。”迈克说，“举例来说，如果你拥有一辆车，你就需要修理和加油。我们不能简单地在发动机上开一个洞加油，而且人的手也不合适。”

也许有一天，手工泡沫模型将成为历史。现在大多数企业完全跳过泡沫或黏土模型，直接采用3D打印原型。如果一家企业既使用手工也使用3D打印原型，手工原型通常先做出来，然后，像迈克这样的高技能服务供应商，将使用光学扫描仪或坐标扫描仪捕捉它的物理尺寸。

手工原型是一种艺术。“一些老的泡沫原型真的是很美的东西。”迈克说。3D打印原型也是一种艺术，汽车或摩托车彩色的3D打印模型看起来与实际产品无异。3D打印机可以制造复杂的和不常见的形状，使得设计师能够实现梦想、完成新颖的设计。而且，3D打印的速度更快。

更便宜：降低产品开发成本

一些3D打印原型被企业用来展示设计概念，其他的原型被用来测试产品生命周期的其他阶段，以搞清楚如何实现产品部件的批量生产。“测试和调试”的3D打印部件将设计复杂的产品的内在缺陷最小化。尽管我们能更轻松地运用数字技术，但是它并不能代替我们亲自用手掂量实物。

测试和调试的原型可以是工程师在模拟生产过程中使用的一系列没有组装的部件。微软宣布之前绝密的产品概念（混合型平板/笔记本电脑“Surface”）时，全世界都为之震撼，媒体想知道微软在保密的情况下如何成功地开发了这款产品。通常情况下，公司在第一次宣布推出一款全新、前沿的技术产品时，其制造工厂都会流出一些神秘的照片。微软公司的硬件部门在一所大学校园里3D打印了机器原型，确保了产品开发的秘密进行。

测试和调试的第二个目的是确保工厂的机器能够按照设计理念制成实物。在工程产品设计课程中，学生花费几周时间在伟大的设计思想和工厂的现实之间进行取舍。厚厚的教科书详细地描述了在生产线上哪些设计理念行得通、哪些理念行不通，常见的成型机或者切割成型机难以制造中空物品、互锁部分或者具有复杂的内部结构的产品。但是，并不是所有的生产挑战在教科书的指导下都可以避免。

如果企业很迟才发现新产品的部件组装在一起不合适，那么先期投资就浪费了。3D打印测试和调试原型能够帮助手机产品设计者装配微小的硬件。助听器、汽车方向盘、剃刀、梳子和智能手机等必须具备舒

适的手感，或者要非常贴合使用者。虽然设计软件和计算机模拟越来越先进，但即使最好的设计也不一定总是能够完全按照计划生产出实物。

更好：生产出最佳的定制部件

定制的终端产品是3D打印增长最快的应用领域之一，定制的部件不是原型而是真正的产品。如果你登录社区论坛，家里拥有3D打印机的人可以交流想法、交换设计文件，如从门把手到浴帘环这样的标准的可替代部件。一些人用3D打印机打印门把手、齿轮、仿古品，或者手工制作成本极高的停产部件。

因为定制部件并不会从规模经济中受益，所以小规模、有技术的3D打印服务提供商开始寻找新的商机。汽车和摩托车制造商（甚至火星车制造商）都使用3D打印定制部件生产概念车或机器，毕竟价值百万美元的车辆用来试驾，代价太大了。

3D打印终端产品广泛应用于医疗行业和牙科产业，因为这些行业的产品必须和身体更紧密、精确地结合。最适合患者的牙套和牙冠以前要靠定做，现在越来越多地使用3D打印。对患者耳道或者残留的肢体进行扫描，根据扫描数据就可以将助听器和假肢打印出来。

航空公司在商用飞机中也会使用3D打印定制部件。下一次你乘坐新飞机时，可以看看座位上方可调整的导气管。飞机的导气管是一个需要高度定制、成本高昂且不能获得规模经济的完美案例，与牙刷尤其不同的是，每年新造飞机数量极其有限。

当我们参观位于中西部衰退地区的另一个小型服务提供商时，他给我们看了一个他一直拿着的半透明的、塑料的3D打印产品。这个产品看上去似曾相识，但是难以准确认出来，它和大蒜压榨机大小差不多，由几个带有互锁孔和齿轮的圆环组成。

我们认不出这个外表看起来奇怪的小工具，他的设计师后来启发我们："这个是3D打印的747飞机的通气孔。"飞机制造商非常渴望减少零件装配，3D打印的通气孔部分能够被单独制造，其中已经包含了一些零件。

按大小对市场进行排列：中国仅占**8.5%**

确切地说，我们不知道有多少小企业已经被吸引到敏捷制造服务市场中，然而存在大量的市场规模数据。增材制造业顾问和分析师特里·沃勒斯每年都会发布《沃勒斯报告》（*Wohlers Report*），这个报告的特点是市场和可用的数据，加上一些案例研究，这些案例是从全球范围内销售3D打印机或者提供或购买打印服务的前100家大公司中筛选出来的。《沃勒斯报告》洞察出增材制造业是一个金矿。对管理人员和记者

来说，这个报告已经成为产业的非官方“国情咨文”分析评论。

特里·沃勒斯采访世界领先的3D打印公司时，他提出的一个问题就是谁会购买他们的3D打印机或者3D打印服务。他的研究显示消费电子公司是3D打印产品和服务的最大用户，接下来是汽车领域、医疗和牙科产业以及航空制造业。

沃勒斯的市场数据表明：美国的3D打印机大概占全球总量的40%；德国和日本的公司也在积极探索和使用3D打印机，3D打印机数量均占全球总量的10%；在中国，要发现可靠的能够证明中国在使用3D打印机的数据是很困难的事情。根据沃勒斯的数据，尽管中国在大规模生产方面占主导地位，但3D打印机数量仅占全球总量的8.5%。

购买3D打印机或者3D服务的公司往往具有很强的财务实力。然而3D打印产品和服务的市场规模仍旧微小，尤其是与主流制造业产品和服务市场年15万亿美元的销售市场规模相比。特里·沃勒斯认为2011年3D打印市场总规模为17亿美元。如果主流制造业的全球市场相当于一个沙滩球的大小，那么3D打印的全球市场则相当于一个乒乓球的大小。

另外，尽管17亿美元的产业规模对世界经济来说很微小，但这一市场可能并不像最初看起来那么小，像迈克公司那样的与制造业相关的小公司散布于全球制造业。事实上，美国人口普查局的数据显示，约1/2的美国制造业企业的员工少于10人，1/4的企业员工少于5人。虽然目前3D打印每年只有几十亿美元的产业规模，但是可能对未来的发展非常重要，而很多小企业年规模几十亿美元的现状却要延续很多年。

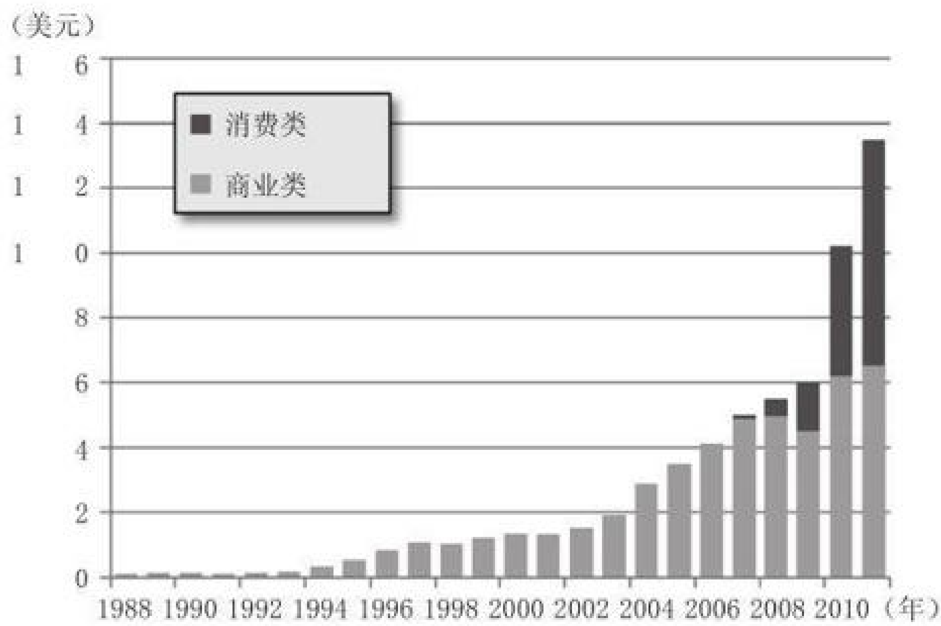


图3–3　3D打印机每年的销售量

注：2007年开始生产的消费性等级3D打印机的销售额（不足5 000美元）超过工业性等级3D打印机的销售额。

资料来源：Wohlers Associates, Inc., and Tuan TranPham

21世纪的空白画布

那些生产3D打印机的企业密切关注着敏捷制造业的新发展。我参观3D打印产业的龙头企业后，收获颇多。从外部来看，3D系统公司的总部与其他中等规模的技术公司一样，拥有700多名员工，从白色的大楼和玻璃的外观也看不出内部具有创造性的能量。

参观3D系统公司，走进等候区，就像走进现代艺术博物馆参观一个有价值的展览。干净的白色墙壁上展示着色彩鲜艳的3D打印物品。在房间的右侧，与游乐园碰碰车大小相近的流线型红色赛车自豪地停在底座上，在左边，展台上摆放着很多3D打印的玩具和机器部件。

在它们附近，摆放着两个3D打印出来的、全功能的、时髦的塑料电吉他。一把吉他是紫色的，另外一把是鲜红色的，由新西兰的奥拉夫·迪亚哥设计。吉他机身的设计是3D打印产品设计的非凡成就，为了减轻吉他的重量并最优化声音质量（并且使外观更时髦），吉他机身被设计成带有弯弯曲曲的切口和奇形怪状的空腔网格结构。



图3–4　3D系统公司打印的电吉他

图片来源：Olaf Diegel, New Zealand

3D系统公司的总部位于美国，它是销售3D打印机最大、历史最悠久的公司之一，可谓3D打印产业的“IBM（国际商业机器公司）”。3D系统公司从20世纪80年代开始销售高端3D打印机，公司的商业战略基于两个目标：第一是制造和销售强大的、高端的工业用3D打印机；第二是履行公司的承诺，通过建立全球端到端的平台帮助人们实现将设计理念转变为实物的想法，即提供“3D打印内容的解决方案”。3D系统公司投巨资于这样一个信念：人们将涌向很容易将数字内容转变为实物的第一个产品。

3D系统公司首席执行官阿贝·雷切托尔将3D打印比作“21世纪的空白

画布”。阿贝将3D打印看作伟大的平衡器。“我认为：如果消除摩擦与恐吓，每个人都具有创造力。”他在公司新产品（一个光滑的、闪闪发光的低成本3D打印机，被称作“方块”）发布会上这样告诉记者。“方块”类似于家用高端咖啡机，它也是3D系统公司在家用市场范围的第一次冒险。方块非常漂亮，与其他家用3D打印机产品（比如MakerBot公司生产的颇受欢迎的3D打印机“复制器”）形成了鲜明的对比。

创新是公司的长期传统。在20世纪80年代中期，3D系统公司的创始人查克·赫尔发明了立体光刻，这项印刷技术现在被世界上许多工业级3D打印机使用。在参观过程中，我注意到，在接待处后面放置着一台老式SLA1，它是3D系统公司在工业领域长期以来非凡业绩的象征。它的外观与20世纪60年代老式的大型计算机主机相似，大小与自动售货机相当。SLA1是世界上第一台商业化的3D打印机，它静静地摆在那里，就在一堆老式的1987年的IBM PC机中。

接待处的桌子后面是几面玻璃墙围成的房间，几个人在里面办理公司的业务。透过玻璃墙，可以看到公司的会议室，它非常大，放着看起来非常庄严的深色办公桌。在另一个玻璃墙壁房间，穿着白色工作服的技术人员正在像护士照顾病人一样忙碌着，里面摆放着24台各种形状和大小的3D打印机—3D系统公司完整的打印机生产线的代表。技术人员对每台打印机的性能进行精细调整，并且测试新材料的性能。

3D系统公司客户部负责人拉杰夫·库卡尼解释说：为了带消费者进入这个领域，3D打印需要一个平台，一个跨越整个制造周期的平台，从3D扫描到设计，再到打印。拉杰夫说：“人们习惯使用谷歌，习惯使用微软，习惯使用亚马逊。我们使用这些战略当中最好的元素，并且将它们整合在这个平台上，使人们以同样的方式体验3D打印。”

3D系统公司的平台战略源于软件产业，在这个产业中，公司的市场地位、消费者的体验依赖于其建立和控制软件平台的能力。举个例子，微软凭借开发Windows系统和Office软件占据了办公平台的领导地位。在移动设备领域，苹果的iPad、iPhone以及iPod为消费者提供了直观、便于使用的产品，并且催生了以应用软件（app）的形式销售软件的全新方式。

为了建立它的平台，在过去三年中，3D系统公司在眼花缭乱的购买对象中筛选出了大约24家公司，这些公司代表了设计和生产过程的几个不同方面。一些公司提供设计服务，其他公司生产打印材料、生产打印机或创建内容和工具。例如，简单的界面帮助使用者设计简单的可3D打印的机器人。

拉杰夫继续说：“虽然3D系统公司擅长生产3D打印机，但我们的目

标是为每个人带来完整的3D捕捉/创建/生产过程。这些不能仅仅通过为人们提供一台3D打印机实现，而是要通过提供给他们一个平台来实现。”

3D系统公司营销副总裁凯西·刘易斯在低成本3D打印领域具有长远的眼光。在2010年加入3D 系统公司之前，凯西是桌面工厂公司（Desktop Factory）的首席执行官，这家公司是首批定位于家用和办公用3D打印机的公司之一。桌面工厂公司生产的家用3D打印机（与同期大多数工业用3D打印机不同）使用日常卤素灯的聚焦光线（而不是通过激光）打印尼龙。

1986年，当查克·赫尔创建3D系统公司时，并没有预料到之后的几十年里，家用3D打印机市场虽小，但会显著增长。当凯西·刘易斯第一次在电子贸易和工业活动展会上展示“方块”时，她没有想到不仅仅是消费者对此感兴趣，一些小型制造业企业也表现出了兴趣。“起初问我们能否将“方块”用于终端制造的人太多了，简直令人震惊。”凯西说，“我认为有必要在市场上帮助企业打破它们目前的范式，从新型制造业中获益。”

今天，3D系统公司持续追踪几个应用的变化趋势，这些趋势将影响3D打印业务的发展。公司认为，对每个人来说，云计算、大数据分析和强大的智能移动设备将催生新的创意和工作机会。这一切主要涉及为3D打印机寻求更有用的应用软件，使人们的生活更美好、更方便。

“为了解决消费者的问题，你不得不关注应用需求。”凯西说，“这不仅是‘让我们制造更快更好的机器’，而且是‘让我们制造真正能解决目前存在问题的机器’。”

研究杀手级应用程序

今天适用消费者的3D打印技术正处于“牛郎星时期”（Altair phase）。在20世纪70年代，第一代个人计算机（比如牛郎星）其实称不上计算机，只能算是一堆难以组装的配套组件而已，技术熟练的用户需要自己在家里组装。首批出售的几千元的低端打印机中，大多数需要用户耐心地安装，还要进行大量的调试工作，有时还需要进行故障排除。不需要用户自己安装的属于例外情况。

在我采访拉杰夫时，他描述了3D打印机主流应用最大的障碍：缺乏杀手级应用程序，或者非常受欢迎的应用程序。他说：“例如iPad，在iPad投产前，平板电脑市场正苦苦挣扎。它并不是最先进的技术产品，但是因为简单、便捷且易操作，引发了产业革命。如果我们关注应用而不是技术，我们将有更多的机会采用这种技术。”

一个杀手级应用程序，比如电子邮件、脸书和愤怒的小鸟，这些产品或工具创建了新的市场、新的商业模式，而且吸引消费者关注新技术，这些杀手级应用程序将数百万的新消费者吸引到个人计算机、互联网和iPad上来。为了开发自己的杀手级应用程序，3D打印产业需要用户友好的工具和应用平台，或者能够创建新市场和吸引数百万新用户的程序。

在某种程度上，因为缺乏杀手级应用程序，普通的消费者和小企业还没有动力购买家用或办公用的3D打印机。3D打印市场仍旧存在于制造业和工业设计中。如果全球范围内3D打印机和服务的产值相当于乒乓球大小，那么全球消费类3D打印机和服务的产值更小，大概相当于一粒米的大小。

投资顾问莫特利·富尔（Motley Fool）对那些开展消费类3D打印业务的公司的潜力持乐观态度。相反，分析师特里·沃勒斯态度谨慎，他警告说，尽管消费者愿意为漂亮的3D打印产品花高价，但“大多数消费者不会自己购买或操作3D打印机制作产品，他们会去Shapeways[(1)]、亚马逊或者临街商店购买这些产品。大多数人都不知道、也不关心这些产品是如何生产出来的—与他们现在购买商品的方式没有区别”。

但是有迹象表明，这个行业仍有增长的潜力。3D系统公司年报指出，2010~2011年，中小型个人或专业等级的（非工业等级）3D打印机的销售收入同比增长40%，该行业龙头企业都斥巨资创建用户友好平台和产品来吸引用户。在商业世界外，越来越多的社区生产商购买和配备家用3D打印机，并且与世界各地分享创新设计文件和免费的建议。艺术风格的小型3D打印公司可以通过设计和销售定制的、3D打印的机器部件、珠宝或者艺术品赢利。

未来，那些阻碍日常使用的技术限制和障碍将逐渐消失，关键在于使3D打印技术更有趣、更社会化，当然也更易于使用。这样的方法使人联想到苹果公司早期的消费者战略，几十年前，当个人计算机成为主流时，史蒂夫·乔布斯解释了为什么一般人喜欢使用苹果计算机：“大多数人没有自动变速器是如何工作的概念，但是他们知道怎么开车。你不必先学习物理，理解物体的运动定律，再开车。”如果3D打印行业开发了杀手级应用程序，并且创造出了一个充满活力的、用户友好的、端到端的平台，市场会呈爆炸式增长。

轮胎也可以打印了

据说，科幻小说作家保罗·安德森曾经说：“任何问题，无论多么复杂，当你以正确的方式看它的时候，不会变得更复杂。”预测未来的3D

打印产品和服务市场同样是一项艰巨的任务。要为客户提供又好、又快、又便宜的产品或服务的潜在的新商业模式，这种模式很难（不，是不可能）用三言两语解释清楚。



图3–5　一个狭小、安静、堆满3D打印机的房间会成为未来的工厂吗

图片来源：Dynacept

经过一个世纪的发展，今天，世界上大多数工业化国家存在两种不同的商业模式，像两条平行线肩并肩、永远不可能相交：大规模生产和手工生产。那些寻求新的市场机会的公司应当超越那些在一条平行线上或者另一条平行线上的产品或服务。由于大规模生产和手工生产的局限性，过去生产产品或服务的方式变得不切实际或失去盈利能力了。换句话说，机遇存在于商业模式而不再依赖规模经济。

想象一下，举个例子，如果汽车修理工（对他自己能否又快、又好、又便宜地修好汽车持怀疑态度）决定冒险进入一个新的领域：3D打印轮胎。由于汽车轮胎是一个典型的、大规模生产的产品，这对他来说是一个大胆的商业战略。他将在汽车修理店内油乎乎的弹簧吊架上安装3D打印机，生产高级的、耐用的橡胶轮胎。

假设他的第一个商业模式是制造和销售3D打印与库存轮胎品牌相同的轮胎。对于熟悉3D打印的人来说，这听起来并不明智。但是让我们假设这位汽车修理工坚持己见，无论如何也要完成他提出的计划。

结果是令人失望的。如果他复制大型轮胎零售商的设计，他的3D打印轮胎会一样普通和没有灵魂，而且造价更高。经历挫折的汽车修理工最终会明白，规模经济是无情的。购买3D打印轮胎将增加消费者的成本（不便宜），现场定制和3D打印轮胎的时间比他从自己的库房中取

出大规模生产的四个名牌轮胎的时间还要长（不快）。确实，3D打印轮胎在设计和质量上很出色，但是如果只有质量，企业难以维持下去。

最后临近破产时，这位汽车修理工坐下来开始反思。他修改过的商业模式将不再依赖于大规模生产的效率，相反，他新的3D打印轮胎业务将为那些愿意花更多钱定制设计轮胎的客户提供产品。

较之于向轮胎专家订购一系列的定制轮胎，他的3D打印轮胎更便宜，而且生产周期相对较短。与现场或者库房里那些通用型品牌轮胎相比，他的3D打印轮胎具有不可比拟的优点。

不像一般的轮胎，定制的打印轮胎可以小批量生产。这些定制的轮胎可以设置客户自己名字的花纹，这样在沙漠或者雪地里行驶可以留下个性化的轮胎痕迹。像满足虚荣的车牌市场一样，一些客户将为了自己的标新立异买更贵的轮胎。可以想象营销和品牌推广的可能性，富裕的大学可以出售印有学校钟塔的轮胎给那些忠诚的校友。

因为小城镇的地方市场比较小，上门的客户不多，所以为了持续经营，这位汽车修理工将利用网店向全球市场销售他的产品。客户可以浏览轮胎设计，或者上传他们自己的轮胎设计。为了节省运费，他可以与不同地方的汽车修理工沟通，委托他们在当地打印定制轮胎。

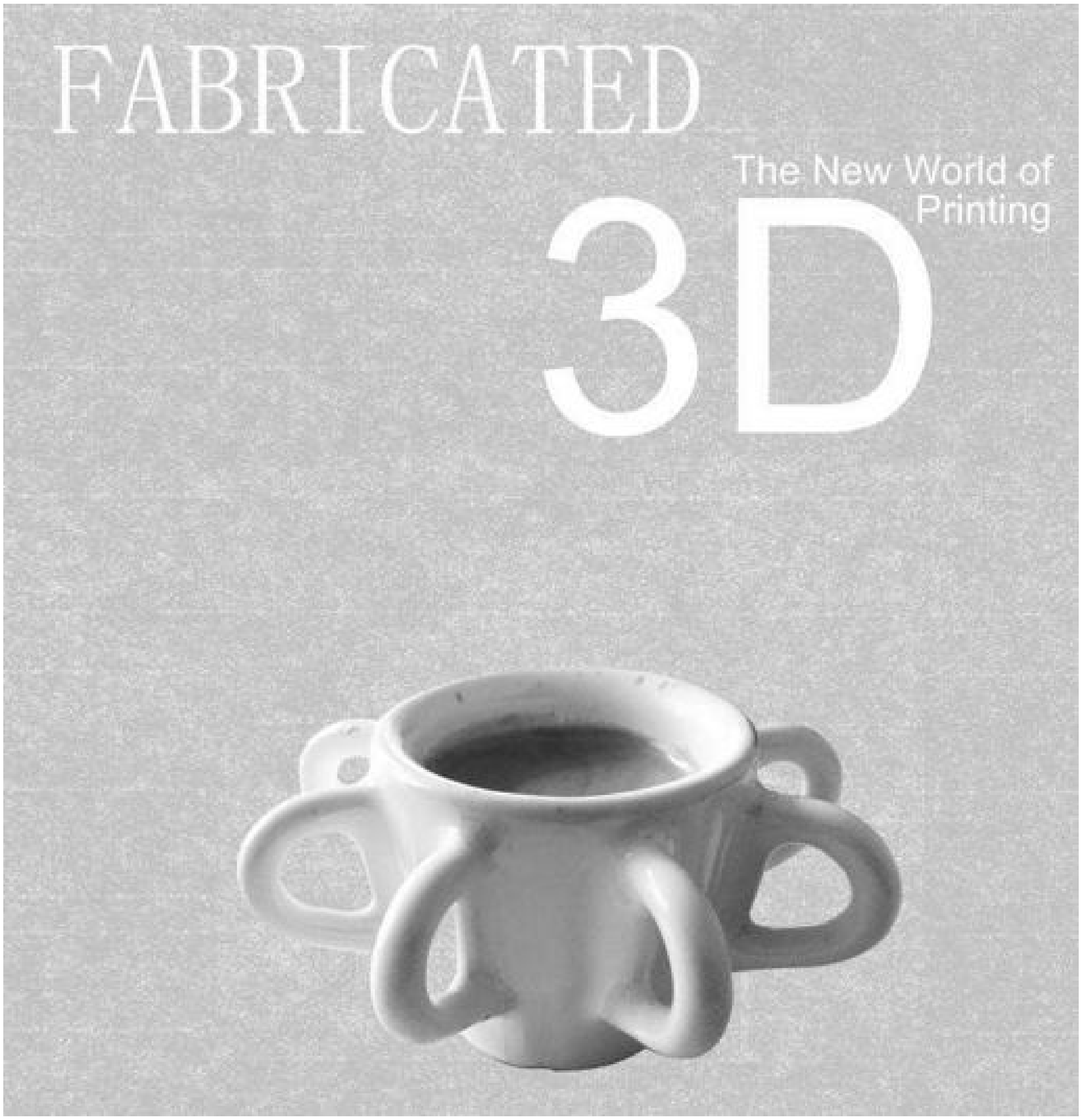
先不提装饰，定制轮胎可以借助3D打印提高产品质量。经过特别设计的3D打印轮胎能够利用计算机算法，根据当地的气候为汽车提供适当的摩擦力。某些车型的车主能够通过定制轮胎改善汽车的外观，并降低发生意外的概率。未来的设计师可能会拿出新颖的轮胎设计方案，以提高轮胎的滚动效率或耐磨性。

确实，要想盈利，这家新一代的轮胎制造商将为3D打印的定制轮胎制定远高于普通轮胎的价格。但是如果有足够的消费者愿意为独创的、品牌的、能够提供最佳性能的轮胎支付高价，销售3D打印轮胎将是很好的商业模式。汽车修理工将收银处老的标签写成："我们可以为你做得又好、又快或者又便宜。请选择其中任意两个（如果你来这里不是为了购买3D打印定制轮胎）。"

【注释】

(1)Shapeways是一家总部位于荷兰的创新制造公司，它利用3D打印技术为客户定制他们设计的各种产品，包括艺术品、首饰和玩具等。——编者注

第4章　3D打印的赚钱之道



关于3D打印最常见的一个问题就是，3D打印这项新技术是否会影响就业。最近我在一所中学发表对3D打印的未来的看法，一个学生也问我："3D打印能帮我找到工作吗？"

我有点儿惊讶并回答他：这个问题的答案没有那么简单。按照经验，像其他革命性技术一样，3D打印将以不可预测的全新方式改变就业前景。我问同学们是否听说过旅行社，少数人听说过。我告诉大家互联网是如何淘汰掉旅行社，如何开拓了旅行相关服务的新市场。同样的道理，3D打印技术将创造新的商业模式，淘汰旧的商业模式，一些工作会被取代，还会出现全新的职业。

这个学生很满意我的回答，但它引发了我的思考：他这一代人能够见证这些改变吗？如今，3D打印在工业生产中已成为主流方式，比如航空航天领域产品线上成批复杂的零件。未来，3D打印将会对经济产生更深远的影响。全球供应链将被灵活独立的小制造商取代，它们能够对变化的库存和市场需求做出快速反应。3D打印技术对经济最大的贡献可能是减少了试行新设想的风险和冲突，不过影响没有那么直接。

云制造：像蚂蚁工厂

由3D打印技术和新型设计技术推动的未来商业模式之一将是云制造。云制造是一种替代大规模生产的方案，由小规模、分布式节点组成。

我们正处在一个庞大的、互联的、分散的互联网系统时代的黎明时期，我们有大数据、大企业、庞大的财务网络遍布全球，我们有复杂的经济生态系统，连泰国的季风都会影响布鲁克林区小企业的存亡。

然而，由于大规模生产的基础是规模经济，因此大规模生产仍然是一个集中的流程，是一个以专业活动为中心的集中流程。生产主要集中在工厂，产品设计主要集中在专业公司。

对比过去几年电信行业的变化，电话网络曾经呈现大型化、集中化的特点，但其便利性却大打折扣，一部公用电话能够满足几个街区的人使用，每个家庭只有一部固定电话。

今天，世界上大约60%的人都拥有手机。每部手机都很小巧，但如果世界各地数十亿部手机连接成分布式的全球网络，将可以合并成一个革命性的、强大的系统。

大规模生产仍然像电话亭，而不是手机网络。但是这会发生改变，像数十亿部手机一样，制造业有朝一日也会形成数百万小型自动组织的生产节点。

3D打印是云制造的催化剂。云制造将成为一个由小型制造业企业组成的超大规模网络的分布式系统。维基百科对云制造是这样定义的："具有各种制造资源和能力，可以智能检测并联结更广泛的互联网，具备自动管理和控制能力。"

克里斯·安德森在他的代表作《长尾理论》[(1)]中将这种集中模式描述为"背着扩音器的蚂蚁"。直到互联网提供了一个全球性平台，个人的声音才能被听到。现在，博主的交流能力已超过大型媒体的记者。3D打印技术将带领制造商、消费者和小公司进入蚂蚁工厂。

每个单独的制造节点都是自主的，而且是互联的。制造商可以根据项目的特别需求，构建或者重构一个临时的集合。经济规模将不再决定

商业模式，因为每部分的成本相同，不论是生产1个还是1万个。每家公司都具备多种技能，能在短时间内按要求制作出各种不同的产品或零件。有时候节点会资源共享。

云制造将通过降低市场门槛的方式推动创新。创新在软件业迅速繁荣，因为虚拟世界的成本比现实世界中低得多。软件产品无须实际盘存，无须原料，对物流运输与安装的要求也很低。

未来有两种场景。

首先，假如你后天需要1万个订书机，你把设计文件和订单提交到制造云。几千个小公司和个人开始响应，这些小公司或者个人用一台（或两台）3D打印机可以打印出一堆订书机并运送给你。

等一等，较之于大规模生产1万个订书机，这样的模式并不具备成本效益。云制造对于简单的商品没有任何意义。在一家工厂几个小时内大规模生产1万个同样的订书机会更加经济和快捷，因为工厂的主营业务就是大规模地生产订书机，所以原料和机器早就准备好了。

但是，如果你今晚就需要定制一辆摩托车呢？你同样依靠制造云。云制造会根据定制部件打印任务自动匹配数千家公司，公司完成任务后还会运送给你。第二天早上当你醒来，你的门外突然出现一辆有着1 000个零件的定制摩托车，这些零件有的是金属做的，有的是塑料做的，有的大，有的小。

你使用云计算时，你并不知道云计算在哪里。基于云的资源可以扩展，还能自动平衡负载。你使用制造云时，不必担心产能。云将智能地在网络上分配生产和协调各公司，成功地满足你的生产要求。

你只需准备好订单，然后点击“提交”。

每个云制造商可能很小。然而，就像数十亿的手机或蚂蚁工厂一样，合并后的整体效能将大于每部分之和。

创客运动

人们将手中的新工具应用于日常生活时，现有技术将被颠覆，新的技术将引发革命。3D打印还不是家喻户晓的技术，但它在这个充满活力、不断增长的制造领域中已迈出了第一步。

创客运动就是DIY（自己动手）创新的活动。没有人确切知道“创客”这名称从何而来，但它已经存在。创客的概念就像软件公司的“超级用户”，又有点儿像“黑客”一样按自己的意志修改软件，创客喜欢按自己的意愿改进技术。

出版公司奥莱利是那些喜欢技术的人的晴雨表。2005年，奥莱利推出了《爱上制作》杂志，采访社会上足智多谋的人，报道在他们的后

院、地下室和车库进行的精彩项目。奥莱利的这个目标是正确的。现在，《爱上制作》杂志已经发展为一本专门报道DIY活动的刊物。制汇节（Maker Faire）已成为一个喜欢自己动手或者喜欢他人动手制作之物的人士的盛会。黑客空间和“发明人的场馆”如雨后春笋般在世界各地的城市出现。

喜欢制造活动的人运用各种技术，而不仅仅是3D打印。一些人自己设计电路，制作服装、乐器，或设计制作自己的机器人。创客运动吸引了那些渴望生产工具的人，吸引了那些地下室里有自己的数控雕刻机和铣床的人。

是什么让人们渴望星期六下午组装3D打印机？是什么让人们渴望耐心地将微小的电子元件组装在一起，从而使他们的3D打印玩具独立行走？有很多原因。有些人喜欢动手，有些人（包括我自己）在解决具体问题的过程中享受到了乐趣，而不是将问题拖上几个月。快乐是一种强大的动力，但我认为还有更重要的。

创客创造美好的东西。浏览网络相册，或者上谷歌搜索“3D打印DIY”，你会看到打印出的怪物、火车套装模型、半透明的棋子。在制汇节上随便逛逛，你可以看到，人们在很短的时间里，利用有限的资源，展示出自己是多么心灵手巧。在2011年皇后区（美国纽约市的一个行政区）的制汇节上，有一个展览叫作“生鱼片会幕合唱团”，我对它记忆犹新，这一合唱团由250个定制的机电鱼和龙虾组成，这些机电鱼和龙虾在一辆车的顶篷上载歌载舞。



图4–1　这个指示标志指向在纽约皇后区举办的“2010制汇节”

关于这些将自己描述为创客的人，还没有太多的具体信息能够表明他们的背景和动机。我读过一份调查报告—那是我见过的几份调查报告之一，调查人员调查了3D打印创客社区有多少注册者。有358人参与了调查，进行调查的是一个组织机构，名叫“在运动中制造”（Manufacturing in Motion）。

调查结果如下：创客有点儿像软件黑客，多数是生活在欧洲或北美的富裕的男士，女性创客的数量在7%左右；创客都受过高等教育，近60%的调查参与者至少具有学士学位。

本次调查涉及一个关键问题：你为什么喜欢制造？超过80%的人回答说，因为他们喜欢3D打印，因为这个爱好，还结识了其他喜欢制造东西的人。98%的调查参与者表示，用电子设备、软件和3D打印机制造东西会获得久违的乐趣。

创客运动的一个伟大之处在于，利润并不是核心动机。创客可以凭兴趣行事，可以承担创新的风险，因为他们不必对庞大的供应链、数千名员工和愤怒的股东等负责，也无须承担专业的设计师和制造商必须承担的巨大责任。创客运动的核心精神是社区、创造力、社会变革和解决问题。

创客运动本身并不能代表轰轰烈烈的工业革命的萌芽，然而创客在增进人们对3D打印技术的认识方面发挥了关键作用。创客像其他早期的颠覆性技术使用者一样，可能会在某一天向人们展示哪些事情是完全可能的。

这就很容易让人将3D打印技术与20世纪70年代的早期个人计算机运动或一场新的工业革命进行一番对比。我做了多次此类对比，这些对比很诱人，因为我们很难扼要地描述3D打印技术对社会造成的影响。

另外，3D打印技术像大型计算机一样开始在工业中使用。第一台个人计算机比较简陋，成本低，还需要组装。首次使用个人计算机的人就像是首次使用家用3D打印机的人。

还有一个复杂的因素增加了个人计算和工业革命的魅力，那就是：3D打印不仅是一种单一的技术，而且是一种广泛的、领先于其他技术的平台技术。3D打印技术像蒸汽机或电报这样的变革性技术一样，也会震惊四方。

体验经济

约瑟夫·派恩和詹姆斯·吉尔摩在他们的著作《体验经济》（*The Experience Economy*）一书中预言，未来公司的竞争优势将越来越依赖客户的体验度。派恩和吉尔摩在书中提到，经济历经了多个发展阶段，从最初的农业经济发展到工业经济，再到今天的服务经济。

在《体验经济》一书中，产品的价值某种程度上遵循产品给消费者提供的连续的体验度。商品产品（通用商品和不常用商品）对消费者至少是有价值的。产品对消费者来说虽然是枯燥的，但也是必需的，就像无处不在的自来水一样。洗洁精、门垫等产品虽然普通，消费者一方面离不开它们，另一方面又不太可能支付高昂的费用。

派恩和吉尔摩认为的商品或者独特而鲜明的产品对消费者更具吸引力，这些商品会是你最喜爱的名牌跑鞋或高科技自行车模型。上述商品都是服务型产品，消费者珍视服务型产品，这些产品效果明显，就像退税服务或做了一个漂亮的发型一样，效果立竿见影。

派恩和吉尔摩花了很大篇幅强调能够促进DIY创新的产品和技术的吸引力。按他们对价值阶梯的分层，处于产品价值阶梯顶端的是那些为消费者提供体验的产品，而在这些体验型产品中，最好的是变革性产品。体验型产品让人有直观感觉，就像你观看一场电影或做一次水疗一样，你能感觉到电影好不好看，水疗效果好不好。变革性产品对消费者有着深远的影响，这些产品不仅产生效益，而且对未来有着长远积极的影响。举例来说，一个大学生参加了为期数月的夏令营活动，或者获得

了新的技能，这都让他受益匪浅。

在体验经济中，利润高的成功公司既销售产品也给消费者带来体验或转变。这些体验和转变引人注目且难以忘怀，对于此类产品，消费者愿意花钱并多次购买。

DIY给消费者带来丰富的产品变革体验，一方面让那些群体意识强的从业者有机会获取新的不太容易学到的技能，另一方面让他们通过设计和自己制造东西获得满足感。3D打印技术使我们超越世俗，突破传统的商品领域、打破沉闷的用户体验。一些当今领先的出售3D打印机或提供3D打印服务的公司，深层挖掘消费者对丰富、难忘和变革性体验的需求。

MakerBot公司

MakerBot公司为客户提供了诱人的集创造性、归属感和技术挑战性于一体的混合体验。MakerBot公司销售的3D打印机的名字都非常好记，比如“Cupcake”（杯形蛋糕）和更流行的“Replicator 1”（复制器1号）和“Replicator 2”（复制器2号）。该公司的创始人之一布雷·佩蒂斯是一个营销策划人，他巧妙地塑造了公司的形象并扩大了公司的影响力。

我的一位朋友对MakerBot公司的能力赞不绝口，他认为MakerBot公司将一台枯燥的增材制造机转变成了一种友善、创意无限、好玩的尝试。“当想到MakerBot公司时，你就觉得有理由追随他们。”他解释说。MakerBot公司的忠诚而热情的客户经常访问其官网thingiverse.com，网站上热火朝天的讨论反映了公司有趣的DIY文化。

生活杂志为读者提供“假日食谱”，帮助读者欢度节假日，MakerBot网站则是提供打印项目和技巧，帮助客户庆祝纪念日、圣诞节和独立日等节日。MakerBot网站也创造了一些特殊的节日，比如“极客骄傲日”。为了更好地庆祝“极客骄傲日”，客户可以下载设计文件，打印特制的毛巾架、被碳封的汉·索洛的玩偶、黑色的时髦眼镜或极客钥匙链。



图4–2　准备运往MakerBot公司位于布鲁克林基地BotCave的新型3D打印机

在我们写这本书的时候，MakerBot公司的业务正密集而疯狂地增长。公司总部从布鲁克林区工业区的小街道迁至曼哈顿市中心，这很容易让人误解MakerBot公司因为媒体的突然关注而一夜暴富，实际情况是，它的创始人亚当·梅耶、扎克·史密斯和布雷·佩蒂斯在这劳苦功高的几年里名不见经传，资金都靠家人和朋友支持。

当我走访MakerBot公司的总部时，现场工作异常繁忙。MakerBot公司最初成立时只有3个热爱DIY的人，如今成为家喻户晓且资金雄厚的公司。在斯蒂芬·科尔伯特的脱口秀节目中，亚当、扎克和布雷用3D打印机给主持人斯蒂芬·科尔伯特制作了一个头部塑料复制品，这开了业内先河。MakerBot公司展现的形象有趣且极具吸引力，亚当、扎克和布雷在电视节目里与众不同的表演，这些都使得MakerBot公司销售收入不断增加。

MakerBot公司的成功之处不在于它的技术。为了将价格保持在消费者可承受范围内，它的3D打印机均采用塑料制作。MakerBot公司的成功在于它的娱乐性，将设计和制造变成对客户来说平等、有趣且充满变革性的体验。

Shapeways公司

随着功能强大的设计和生产工具的日益普及，专业人士和业余爱好

者、买方和卖方、设计师和消费者之间的界线逐渐模糊。如果说MakerBot公司是3D打印机的供应商及体现自由奔放的创意和在线社区，那么Shapeways公司则代表创新型设计市场。Shapeways公司是一个基于网络的社区/市场，为设计师托管店面，为客户托管以设计文件发送过来的3D打印产品。

Shapeways公司的总部设在荷兰， 2011年搬到了纽约。和MakerBot公司一样，Shapeways公司正在迅速成长。2012年年底，Shapeways公司在长岛开设了一家拥有50台3D打印机的工厂，这让出席开幕仪式并用3D打印制作的剪刀进行剪彩的当地政府官员兴奋不已。

我们参观了Shapeways公司在纽约的办公室，和MakerBot公司一样，现场气氛愉悦，但一片繁忙。高大的曼哈顿中期时代的办公大楼大堂里散落着木制脚手架，大堂及电梯里的Shapeways公司名也被不明人士涂抹了。经过几次无果而终的上上下下，我们终于在九层找到了Shapeways公司。

Shapeways公司的共同创办人罗伯特·斯温伯格在门口迎接了我们。我几年前曾在艾恩德霍芬见过他，当时Shapeways公司只有几名员工，“工厂”位于一个乡村工业园区的建筑物里，里面只有6台打印机。罗伯特热情地迎接了我们，并为我们提供了热咖啡。咖啡杯是3D打印的，造型很奇特，有6个手柄。



图4–3 Shapeways公司用3D打印机制作的咖啡杯（可使用）

2007年罗伯特和其他两位创始人共同创办了Shapeways公司，之前他

在一家咨询公司担任白帽黑客，负责入侵公司的计算机网络找出安全漏洞。在罗伯特看来，辞去咨询公司的工作、组建3D打印服务公司非常有意义，“这家公司为个人制作提供平台，向专业人士和消费者开放”。罗伯特认为消费类3D打印的未来基于以服务为导向的“平台”的理念，而不仅是在家中制造。

“Shapeways公司像亚马逊的平台，是人们推销自己产品的窗口。”罗伯特解释道，“2002年，杰夫·贝佐斯给亚马逊员工发送了一份内部备忘录，里面提到亚马逊打算成为一家平台公司。”贝佐斯这一在当时将改变电子商务未来的指示是这样下达的，公司内部的各个团队必须通过应用程序接口向他人或外界公开他们的数据。十多年后，亚马逊成长为互联网上最大的电子商务平台，产品供应商、存货商和其他软件公司均可自由访问此平台。

平台战略有可能引导Shapeways公司的商业模式，它的神奇之处就在于设计师的艺术性和广泛的材料选择范围，人们在打印时有很多选择。如果你买了自己的3D打印机，就可以在不同颜色的塑料材料中做出选择。我们写作这本书时，Shapeways公司就可以提供25种不同的打印材料供客户选择。Shapeways公司出售商品的范围极广，从设计师马克·布卢姆菲尔德为客户定制的魅力手镯，到弗朗切斯科·德科米泰的抽象艺术。Shapeways公司的网店业主们也开始真金白银地赚钱了，其年收入可达数十万美元。

Shapeways公司的设计师和消费者目前尚未涉足日常用品的打印，例如汽车零部件、印刷或制作注塑模具。想要实现这些产品的实际生产，依赖于另一家开创性的DIY业务公司100kGarages。100kGarages公司的客户遍及全球，既有技术纯熟的业余爱好者，也有兼职的专业人士。100kGarages公司的创始人特德·霍尔和比尔·扬建立了一个在线社区，供买卖双方交流，创客和买家可以把产品制作成“想要什么样，就是什么样”。

100kGarages公司

特德·霍尔说：“没人专门从事为别人制作东西的工作。”很多积极的用户都是专业的小生产公司，配置一台数控雕刻机或一台3D打印机，希望赚一点儿外快。特德说：“但是，我们从制造商和消费者那里听说，他们通过100kGarages公司在网上建立联系，然后在线下签署更大的合同。”

100kGarages公司最初的两家客户是Ponoko和ShopBot Tools，这两家公司通过100kGarages公司建立了合作关系。100kGarages公司的运营模

式是消费者在网站上发布项目需求，创客和专业的制造商进行投标。Ponoko公司是新西兰一家聚合器厂商，从事聚合器的定制设计和制造业务，它喜欢把自己描述为“世界上最简单的决策系统”。ShopBot Tools公司的总部设在美国，制造和销售数控机床。

虽然互联网已使专业社区之间彼此相联，但特德和比尔发现在可能的情况下人们还是愿意就近选择。100KGarages公司的客户并不根据距离选择他们的制造商。但是，特德解释说：“人们在东西设计出来后，还是喜欢选择本地制造商帮他们制作模型。如果产品最终得以出售，那么他们会在客户附近寻找商店销售，这样就能够使用当地的材料以节约成本。”

类似贝宝的便捷支付方式促进了网民之间的网上交易，但小厂商因为无法预付材料费而很难从中受益。特德解释道：“大部分制造商希望先收钱再付货。”

另一种能促使互联网经济发展的技术就是进行互联网用户评级。特德说：“我们无法认证。制造商证明自己最好的方式就是在网站上发布他们的作品。卖家通过作品证明自己，买家通过信用评级证明自己，这才是一个行之有效的系统，将促进互联网经济的蓬勃发展。”

打印产品有经济效益吗

新技术和新商业模式在互联网上迅速推广，大有燎原之势。与此相反，制造业的创新却是一个非常缓慢且谨慎的过程。布鲁斯·克雷默是美国国家科学基金会的项目负责人，他长期以来一直热衷于3D打印和个人层面的制造工具。他的体会是制造业的创新风险极高，高得甚至令人生畏。他解释说：“制造业的创新需要新技术，使其能够规避风险，更像互联网及软件社区。”

如今大规模制造业是世界经济发展的支柱，但仅仅是它的规模、复杂性和实际物流就使创新具有一定的风险。大型制造企业在创新方面必须谨慎行事。制造业的核心思想就是减少营业成本，遵守环境和工作场所规定，并有效地将货物从一个地点运送至另一个地点。

3D打印技术降低了新产品推向市场的风险和成本。前期投入减少使很多小型制造商能够一次生产几个产品以响应客户的需求，并扩大适销产品的产量。例如，生产一个手机套如果采用传统的注塑模具，最少需要投入10 000美元的模具费。这笔初期投入必须通过极大的销量冲抵，更重要的是，这种成本形成了“创新阻力”，使小创意无法得到实验，除非成本被抵消。但是，就像进化论生物学家告诉你的那样，大的突破性创新往往是由很多小创意组成的。

3D打印使很多小想法的尝试成为可能。小公司或个人可以小批量地制造和销售某种未经测试的产品，先观察市场的反应，这样就降低了财务风险。通过这种3D打印技术，企业不需要像目前的制造环境一样，购买机械设备和基础设施开展新的投资。

从零起点到规模化生产：**3D**打印兼职也可做到

创新阻力并不只是大企业的烦恼，也是个人发明者需要特别关注的。任何行业中的新商业模式都需要被民主化的制造工具激活，个人制造工具将企业家从密集的资本资源和技能中解放出来。未来的企业家将能够比以往尝试更多的新产品和新商业模式，而几乎不需要任何前期投资。



图4–4

注：马克·肯德里克设计和销售的独特的不锈钢火车零部件模型。图为Shapeways公司销售的3D打印“排障器”。

图片来源：Mark Kendrick

有新业务想法的企业家将能够向企业及潜在投资者证明他们的想法，或者推迟投资的必要。这种商业模式通常被称为“从零起点到规模化生产”，降低了准入门槛，使制造和零售更加大众化。

如今推出一个新产品需要制造商进行大规模制造：工业级制造机器一次不能只制造一个产品。希望成为企业家的人必须采购大量材料和机器设备以实现规模经济，而且还要为必要的零售货架空间埋单。

3D打印技术可以使人们在从事日常工作的同时，探索他们创新产品

的市场潜力。小公司不需要投资购买昂贵的机器、租赁可能根本用不着的货架空间或聘请专家技术支持，从而没有这些方面的财务风险。生活在发展中国家、没有足够资本的人也能够在当地制造中心开展生产，而无须支付基础设施费用，因为他们可能永远也不会使用这些基础设施。

3D打印降低了业务启动成本，为企业家提供了成本更少、风险更小的市场路径。企业家可以先3D打印一两个产品样本，观察他们的创意是否具有市场潜力，而不是一开始就筹建工厂。如果第一批样品销售成功，他们可以制造更多的产品，也可以按照客户的要求修改设计。如果需求持续增长，他们可以将生产扩大到传统工厂的规模，或者投资加大3D打印量。

FabApp：就像**iPhone**应用程序一样

3D打印的未来设计将来自意想不到的地方。比如你想设计并3D打印一把更好的发梳，你不太可能设计出一把好看的、符合人体工程学又安全的发梳，尽管发梳看起来是一个简单的产品，但仍需要多年的经验和技术才能设计成功。然而，随着3D打印机的出现，人们即使没有经验也可以设计自己的产品。

未来3D打印的设计可以来自可下载的制造应用程序，即FabApp（这个词是由我以前的学生丹尼尔·科恩和杰夫·利普顿创造的）。一个FabApp就像一个iPhone应用程序一样，其中涵盖一小部分应用，但可以为购买者带来定制化和易用性的完美平衡。

购买一个FabApp需要99美分。你可能会为某一特殊需求而购买一个FabApp，比如你想为你的自行车手柄定制一副把套。你在线购买一个FabApp，它会在设计过程中提供指导。你上传一张你的手的照片以及你的自行车手柄的快速光学扫描（确保完美的贴合），最后一步是选择一种颜色和材料，点击“打印”，几分钟后你就可以自豪地拥有一副全新的完美贴合的手柄把套了。

FabApp还将为未来的专业设计师提供一种新的业务模式，也就是将设计师的专业设计知识融入分布式制造这一成长型经济中。像iPhone应用程序一样，FabApp将产生新的经济。定制化打印应用程序将在那些有限而复杂的市场中发挥优势，而这些市场可能太小，不足以吸引那些大型制造企业，但却足够为小型企业和个人提供机会。

连续定制和产品多样性

为什么有些技术惊天动地，有些技术则悄无声息，对我们的生活没有一点儿影响？新兴技术出现后，曾经高昂的成本、距离和时间壁垒都迎刃而解，这时创新也应运而生。3D打印的出现使两项高昂的成本消

失，即定制成本和产品造型成本。

定制产品很贵，相应地要想使产品多样化也花费不菲。公司不能完全满足客户对产品种类的需求，要弄明白客户喜好什么样的产品，不仅花费巨大，还容易出错。

能提供定制产品服务的公司不仅速度慢且费用不低。一般的公司可能也能开展这项业务，但目前这一可能依然未知。 要想定制复杂的产品，不仅需要多种选择，还要适应不断变化的市场，因而传统的市场调研方式已无法适应当今的市场趋势。

这一现象在创业公司身上尤为明显，因为它们根本买不起传统的市场研究工具。在埃里克·莱斯的著作《精益创业》（*The Lean Startup*）中，他建议企业探索和尝试多个思路，并在运作中调整战略。莱斯认为，创业公司应进行一系列稳定的小规模的精益尝试。

3D打印技术将帮助企业快速进入市场，对新产品进行测试，以适应不断变化的市场需求。通过3D打印各种类型的定制产品，企业可以提供给客户多种选择。传统工厂生产的产品要想改变，需要大量的金钱投入。即使是在工厂小批量生产，对此种需要反复和持续的市场测试的产品来说，依然花费巨大。

试想一下，你刚刚创立了一家新公司。你出售软件产品，但不确定有多少客户愿意购买该产品或者客户需要产品具备哪些性能。莱斯建议，创业公司提供不同类型的产品，向不同的客户报不同的价格，然后公司收集数据，改变产品参数，然后再次投入市场。数据收集的模式需要显示产品的最佳性能，并选择最合适的产品定价。

按照惯例，对数码产品来说，这种动态尝试更容易实现且成本较低，关于用户的偏好和购买习惯的数据比较容易获得。对于实物产品，实时测试产品的变量就变得很难实现，并且用户的数据更难以收集。

如何把好的原则应用于实物产品呢？试想一下，你的公司出售手机套，你想比较两个手机套，一个后面印有星形图案，另外一个则是普通的手机套，上面没有任何图形。你可以同时销售，看看哪种手机套销量更大，但在此之前，你需要把两种手机套都实际生产出来，并为生产所需的两种不同的注塑模具埋单。

有了3D打印机，你生产1 000个不同图形的手机套与生产1 000个图形相同的手机套一样容易。你可以提供种类繁多的不同图形的手机套，在你的网站上架销售，看看销量如何。

有些图形的手机套的成交量可能为零，有些可能销量很少。最后，你可以知道哪种图形的手机套卖得最火，这就是经过证明可以投资的手机套。

一个月后，你可以重复这个实验，把那些无人购买的产品下架，并对受欢迎的产品进行调整和改良。达尔文的进化论和自然选择就是这样，你可以不停地改进你的产品。

这样的过程只有在3D打印机形成规模经济后才能成为可能，目前3D打印机因其制造产品周期短且不需要太多前期投资而广受追捧。这是一种全新的方式，你可以迅速发现哪种材料可以制造成产品，哪种不行；哪种产品受欢迎，哪种没有市场；哪方面需要改进，哪方面表现出色无须改进。这就是快速适应性。

多样性是一把双刃剑，需谨慎使用。随着3D打印机可以为客户提供种类繁多的实物产品，我们也可以开始体验已经有点儿超过正常范围的多种选择。然而为客户提供太多的选择也要注意适度，否则会适得其反。

性和娱乐

小批量生产的定制产品以高价出售，对于性行业来说很理想。性和色情加速了早期互联网的发展，事实上，一些人认为流媒体视频技术（在此之前是VCR）迅速发展的强大动机之一就是为色情客户提供更好的体验。视频游戏是另一经济巨头，有些人认为，游戏技术是改进图形显示技术的主要推动力。

总有一天，3D打印技术会应用于性行业和视频游戏行业。人们不愿在别人面前承认这一点，但是人们会经常谈起有人用公司的3D打印机打印了一个性玩具，或者他们会说，公司的3D打印机需要使用的某种聚合物材料总是不够用，原来是因为有人下班后用公司的材料打印性玩具。

哪里需求强烈，哪里就有利可图。这是距我们一步之遥的商业模式，但是目前为止，3D打印领域领先的企业还是审慎地远离性市场。

当第一家3D打印性用品商店出现的时候，应该是很有趣的。人类的创造力是无限的，如果在自己家中，人们具备制造独特新颖玩具的能力和相关设备，再加上扫描技术、简单的设计软件和机器人，那么各种可能都会出现。

微型金融和微型工厂

小额贷款、小额信贷和小额交易是一种新兴的微型金融经济。由于通信技术和网上银行可以快速处理国际交易，小规模交易才得以实现。与大额投资相比，多笔小额投资更容易实现。在某些地区，多笔小额投资可以比几个精心挑选的大额投资产生更大的影响。

传统的放款人往往更愿意将资金投给信用记录好的借款人，然而一

些有天赋的企业家、发明家和制造商往往缺乏这样的记录。

小额贷款减轻贫困的潜力巨大。世界各地都有一部分人群很难获得贷款或投资进行创新，比如妇女、少数民族和贫困人口，但获取途径更容易的小额贷款改变了这一切。

截至2009年，估计有7 400万人获得了小额贷款，总贷款额为380亿美元。还款率是95%~98%，这比一些大银行甚至是国家的还款率还高。

小额融资战略可以直接和未来的商业典范（微型工厂）相媲美。微型工厂得此名，是因为其物理规模小、生产规模小。但是，微型工厂可以使用小额投资减少投入的时间，从事全方位的分散业务。像小额贷款一样，微型工厂可以产生积极的经济影响，改变低收入群体的现状，使弱势群体获得应有的公民权。

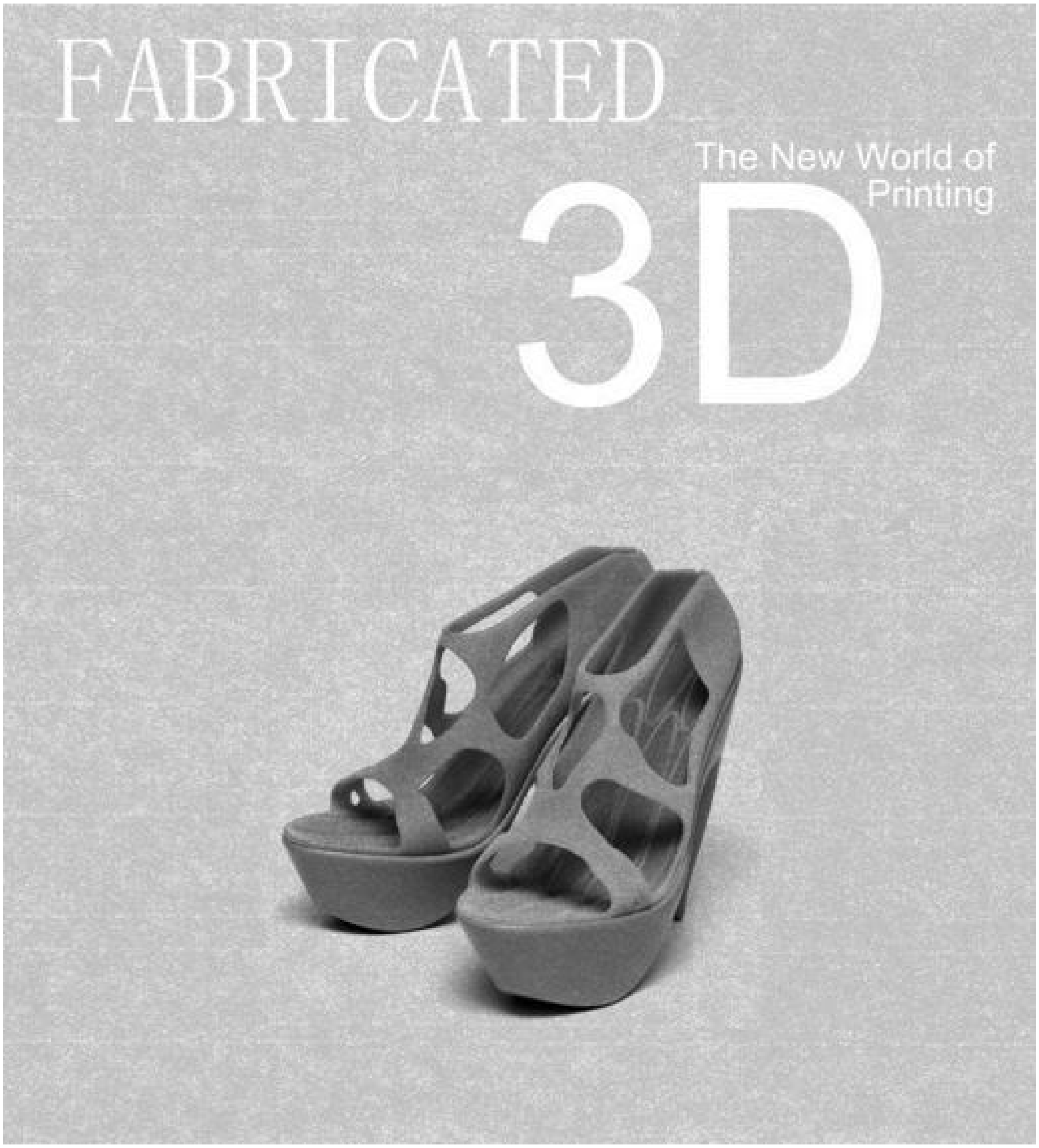
相关的社会发展趋势有利于微型工厂的成长。通过使用开源代码的协同业务模型，微型工厂可以获得必要的专业知识和工具。通过在线大众外包，微型工厂可以探索新的思路。通过大众融资，微型工厂可以为新思路筹集资金。

以后，经济发达的国家不能再依赖通过大规模生产产生利润的经济模式。低工资的制造工作和低利润的商品生产将继续转移至低劳动力成本的国家。3D打印技术将帮助企业建立新的商业模式，开拓未来经济中能盈利的职业。为了生存，企业必须追求价值链的高端，制造和销售高利润的产品和服务，为消费者提供个性化和革命性的体验。

【注释】

(1)《长尾理论》一书中文版已由中信出版社于2006年出版。—编者注

第5章　3D打印机是如何打印的



本章内容主要针对那些喜爱技术、希望挖掘3D打印过程中机械奥秘的读者。对于其他读者而言，阅读过前面介绍的3D打印技术的简要说明后，完全可以理解本书的其他内容。所以，如果你对本章内容不感兴趣，可以跳过，直接阅读本书的其他章节。

3D打印的正式名称为“增材制造”，这非常恰当地描述了3D打印机的工作原理。“增材”是指3D打印通过将原材料沉积或黏合为材料层以构成三维实体的打印方法，“制造”是指3D打印机通过某些可测量、可重复、

系统性的过程制造材料层。

一台3D打印机可以小到放入一个手提袋，也可以大到一辆微型面包车大小。3D打印机的造价可从几百美元到50万美元不等，它们共同的特点是按照计算机的指示将原材料按层堆积以形成三维物体。

基本打印制造过程

3D打印的本质是制造过程而不是打印过程，这也是当我们听到跨国公司ABC成像公司将3D打印加入其服务范围时便十分好奇的原因。为了解更多，我们联系了负责ABC成像公司3D模型和快速成型业务的约翰·T·李，他邀请我们去ABC成像公司位于华盛顿的总部参观，以了解3D打印的过程。

“ABC成像公司是应客户要求才进入3D打印领域的。”约翰告诉我们。多年来，公司一直从事纸质蓝图的打印和其他打印产品，现在的客户都喜欢三维产品。约翰说：“我们为建筑工程公司制作建筑模型和产品原型，我们的客户希望可以将有形的、可传递的实物展示给其客户。”

ABC成像公司成立于1982年。大约5年前，公司聘请了约翰管理其不断增长的3D模型和快速成型业务。约翰于 20世纪90年代在莱斯大学学习地质学和地球物理学，他在一家生产三维地图的公司工作时接触到了3D打印。

在ABC成像公司位于华盛顿的总部，从精心设计的网站到主会议室完美无瑕的顶级斯堪的纳维亚风格办公桌，无处不彰显着公司的品位与对细节的关注。ABC成像公司已从一家华盛顿的打印店成长为在全球拥有35家分店和550名雇员的公司。在介绍完后，约翰带我们到了ABC成像公司的生产区。其主打印室有教室那么大，里面弥漫着舒适的新工业气息。员工们身着商务休闲服饰，正在维护几台嗡嗡作响的大型工业级3D彩色打印机。

我问约翰他认为3D打印是打印过程还是制造过程，他顿了一下，回答道：“我认为‘3D打印’这个名称基本上是个营销术语。3D打印是制造过程—它可能是一个释放污染物的物理过程。我们在工作中会使用化学品，根据情况有时还要戴防毒面具。”

ABC成像公司拥有不同型号的工业级3D打印机，它们分散在世界各地的各家分公司。在华盛顿总部，其小型3D打印“工厂”位于主生产区几个工位后面的小角落。这个灯火通明的玻璃房曾是公司的小厨房和员工休息室，房间里两个中等规模的工业级3D打印机基本占据了一面墙。

约翰负责的打印业务可在一两天内利用高端3D打印机制造出精致的

彩色模型。根据模型的复杂程度以及客户设计文件的类型（是粗略的、未经测试的草稿，还是无懈可击的、可直接打印的设计），制造时间表各不相同。大多数原型打印成白色即可，但一些模型或是地图也需要彩色打印。

在ABC成像公司的打印室里，一台方形机器放在几台3D打印机旁边。方形机器的前端是玻璃的，两边各一臂孔。在机器玻璃板的后面配有强力空气枪。约翰向我们展示了如何将双臂放入孔内，并用空气枪吹散刚打印出来的物体上的粉末。在对面墙上，几个小型的金属池里的溶剂正在沸腾。打印出的物体将浸在池内溶剂里，以完成表面处理并溶解掉残留粉末。

约翰向我们展示了一个白色的帝王豪宅建筑模型。豪宅前面竖立着8根立柱，构筑起了一个庞大的游廊。屋顶上，精致的栏杆环绕着雕刻成放射状的圆顶。豪宅右侧，一道蜿蜒的楼梯把游客引向前门。

豪宅屋顶露台的围栏像蛛丝一样细，如此精致的建筑模型既无法用注压成型这样的传统塑料加工技术实现，工匠也不能用雕刻工具以其精湛的技巧将模型从塑料块中雕塑出来，传统的硬纸板模型也不能胜任。如果要雕刻出游廊柱子后面的开阔空间，柱子就会在压力下折断。

约翰想在打印创作方面不断突破，想制作更精致的物体。他说：“3D打印让你可以制造一些令人称奇的模型和零部件，一些用3D打印制作的几何体是无法用其他方法制作出来的。”

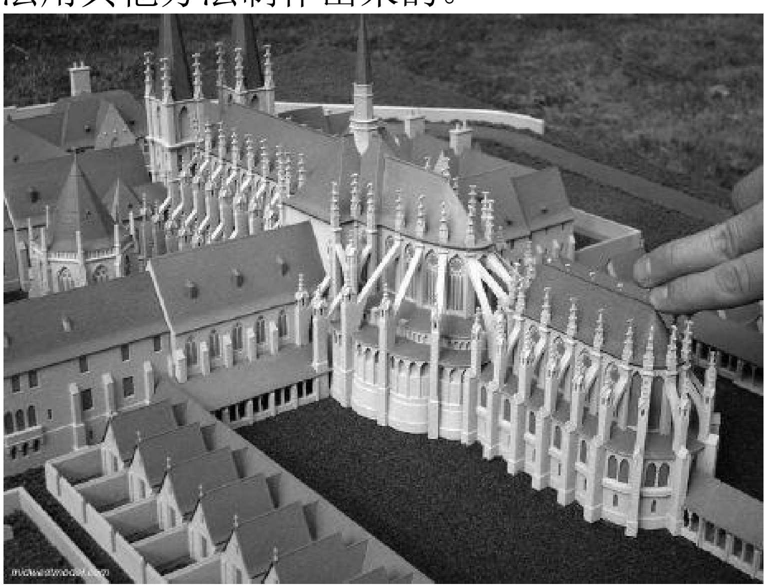


图5–1　3D打印的最终模型：一座古老的修道院

图片来源：Midwest Studios. Photo：Ed Watson

3D打印机的两大家族

向人们介绍3D打印时，我经常会说3D打印有两大家族，第一个家族

通过沉积原材料层制造物体，第二个家族通过黏合原材料制造物体。

第一个家族我们称之为“选择性沉积打印机”—将原材料沉积为层，这类打印机通过某种注射器或打印头注射、喷洒或挤压液体、胶状物或粉末状的原材料。家庭或办公室应用的通常是沉积型3D打印机，这是因为激光或工业热风枪相对来说容易产生危险。

第二个家族是将原材料黏合在一起（不是放置或沉积）的打印机，通常是利用激光或在原材料中加入某种黏合剂来实现，这类打印机被称作“选择性黏合打印机”—利用热或光固化粉末或光敏聚合物。不知道你是否还记得那个推销员的话，他告诉我和我的同学：他是在一台机器上利用激光打印出他的模型的。

喷射、挤压或喷雾打印机

首先，我们探讨使用打印头沉积原材料的选择性沉积打印机。所用原材料可以是遇到打印台就会变硬的软塑料、原始的饼干面团或是特殊医疗凝胶里的活细胞。如果你在媒体上看到过诸如MakerBot的消费类3D打印机，你可能已经见过上述这种打印机了。

这类打印机所应用的打印技术的正规学名是FDM（熔融成型）。FDM打印机是斯科特·克伦普于20世纪80年代发明的，他凭借该技术创立了公司。如果一台机器被称作“FDM打印机”，那就意味着这台打印机会通过打印头挤出某种软质材料。

打印头开始工作前，这种类型的3D打印过程已经开始了数个步骤。第一步是定位软件设计文件，该文件可以告知3D打印机的内置软件（就是常说的“固件”）需要打印什么。一旦设计文件准备就绪，用户便将笔记本电脑连接到打印机，并将设计文件保存为能被3D打印机的内置软件读取并使用的特殊格式（我们稍后将详细解释转换过程）。

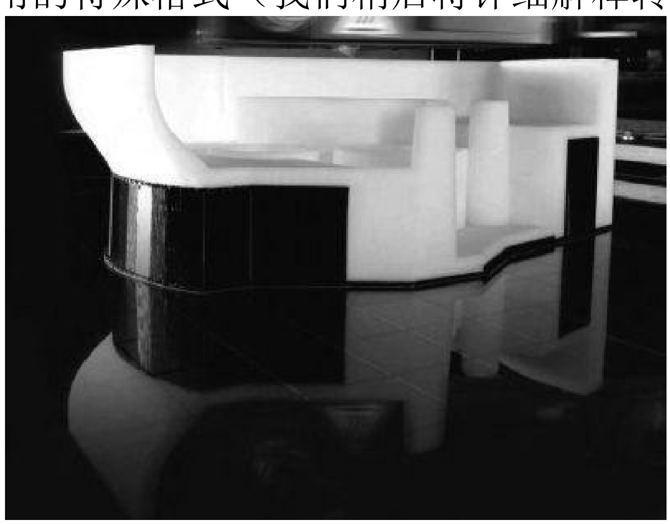


图5–2

注：白色的物体正在被打印，如果仔细观察可看见锥尖在接触白色部分的顶层并挤出细缕白色塑料。黑色塑料是打印的支撑结构，稍后会洗掉。

图片来源：Stratasys Inc.

一旦打印机固件开始读取文件，它将计算出打印头的机械路径和动作。例如，打印头需要知道在哪里沉积出外形的轮廓，以及在哪里喷射多少材料等。

3D打印机固件完成操作计划后，物理打印过程就可以开始了。沉积材料的打印头通常沿着一系列的水平、垂直轨道（工程师们称作“桁架”）移动。沉积第一层时，打印头先勾勒出要打印物体的轮廓。第一层勾勒出物体的基础，就像在咖啡杯底部用铅笔描画出其形状。然后打印头来回扫描以填充轮廓，就像孩子在图画书中按形状填充颜色一样。

第一层打印完成后，打印头会略微抬起，然后回落并开始第二层打印。3D打印机持续重复该过程，耐心地打印出设计文件所描绘物体的每个横截面，这一过程可能持续数小时甚至几天。

3D打印家族的这个分支的优点在于其打印技术可以简化为技术含量相对较低的版本。简化版本的成本低、可使用的材料范围广。任何可以通过喷嘴挤压的原材料都可以进行3D打印。霜状白糖、奶酪和饼干面团是热爱美食的打印爱好者喜爱的原材料。另一种新兴的打印材料是“活体墨水”，它是一种特殊医疗凝胶中的活细胞混合物，医学研究人员使用这种医疗凝胶研究生物打印。

制造公司和设计公司使用昂贵的大型3D打印机，选择性沉积是家庭、学校或办公室的理想选择。即使是低端的3D打印机运行起来也很安静，而且它们使用相对低温的打印头，和高功率激光3D打印机相比，操作更安全。

选择性沉积打印机的主要缺点在于它只能打印可以通过打印头挤出或挤压的材料。熔化的金属或玻璃必须在不同的条件下成形，目前市场上大部分选择性沉积打印机使用的材料是为其特制的一种塑料。3D打印塑料以意大利面状的细条形式按卷出售，其末端直接连接打印机，在打印机中融化并通过打印头挤出。

Polyjet打印机

Polyjet打印机是选择性沉积打印机中最年轻的成员，它由以色列一家名为“Objet　Geometries”的公司（2012年与Stratasys公司合并）开发。Polyjet打印机借用了3D打印家族两个主要分支的技术，其打印头将液态光敏聚合物喷射为很薄的层，再通过UV（紫外线）光将其固化。

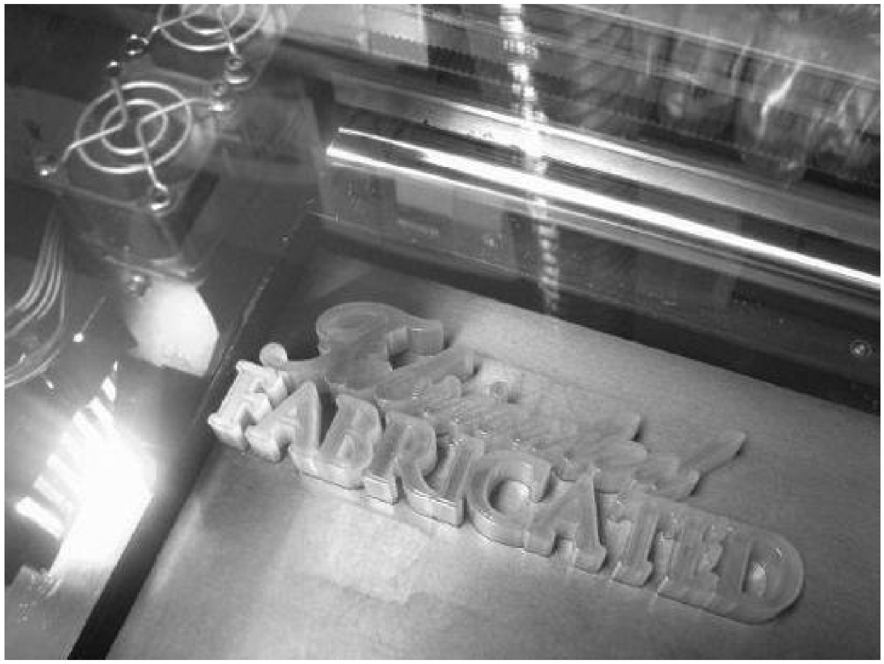


图5–3　Polyjet打印机制造的本书封面的候选样

使用Polyjet打印机打印的好处是喷射的液滴落下后可快速、精确地形成16微米的薄层（参考：一个红细胞的直径约10微米）。Polyjet打印机的精确度高，因此十分适合应用于注重高分辨率形状和快速打印的工业或医疗行业。Polyjet打印机可同时使用多个打印头，因此可以在一个单独的打印作业中使用多种材料。

Polyjet打印机的主要缺点在于其所使用的打印材料的固有局限性，它使用的是一种被称作“光敏聚合物”的塑料。光敏聚合物是一种能对UV光产生反应的、高度专业化的昂贵塑料。塑料是最耐用的制造材料之一，但大部分光敏聚合物仍十分脆弱易碎，这限制了其应用范围。

激光工程化净成形

选择性沉积打印机家族的另一成员是LENS（激光工程化净成形），将材料粉末吹入精心引导的高功率激光束。错过光束的粉末会落在一边，遇到激光焦点的粉末会立即融化并融合到增长部分的表面。因此，当激光的焦点扫描过打印对象的轮廓，打印头吹出更多的粉末时，部件就会一层一层地逐渐增长。

这种工艺的优点在于它可以用硬质材料（例如钛和不锈钢）制造物体。这种金属“打印”发明之前，由于3D打印只能使用塑料（聚合物）材料，因此大型产业并不是很重视3D打印。像LENS这样的金属打印工艺出现后，航空航天、汽车等大型产业开始对3D打印产生兴趣。现在，通过LENS技术，人们可以使用硬金属材料制造复杂的物体，例如具有内部冷却通道的钛涡轮叶片。

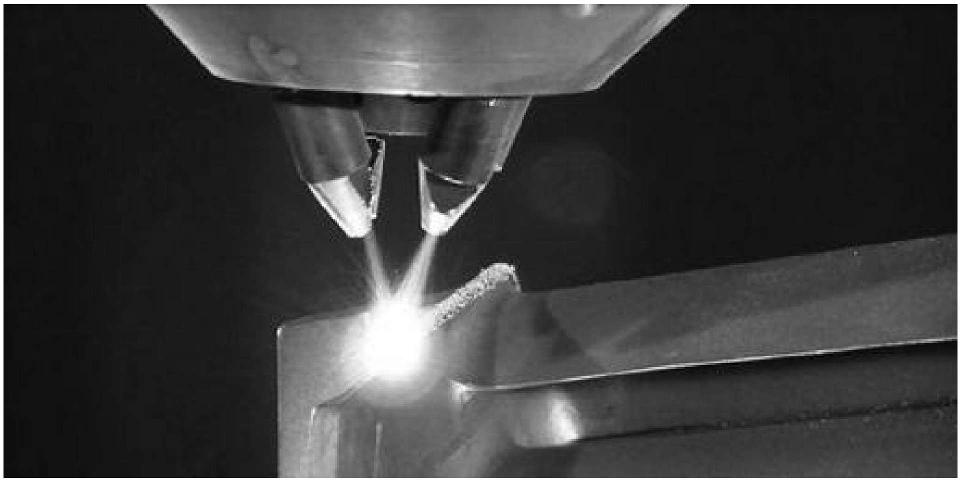


图5–4　金属粉末吹入激光束，遇到焦点的粉末融化并逐渐形成金属部件

图片来源：Richard Grglls, Optomec, Inc.

由于多个打印头可同时向激光束吹粉末，可以同时使用多种基础金属按不同的比率“打印”合金（混合金属），该比率甚至可以根据打印头的位置调节，生成各种级别的合金。

分层实体制造

最后介绍的一种选择性沉积打印机是LOM（分层实体制造）打印机。LOM打印机不使用打印头生成层，而是像它名字所描述的，将材料薄片层压成一个单独的三维实体。

LOM工艺由设计文件开始，进行打印工作的不是打印头而是刀具或激光束。在设计文件的指引下，刀具将实体外形的轮廓从纸、塑料或金属的材料薄片中切出。想象将一个咖啡杯放在一张纸片上，沿着杯底的形状切出轮廓。

切完一张薄片后，LOM打印机将切出的部分放至一边，铺入一张新的黏合薄片开始下一层的切割。打印机将切好的纸、塑料或金属薄片堆叠在一起，当制作对象的所有横截面都切好后，将这些切片层按压融合为一个三维实体。LOM打印机制造的一些铝箔模型是利用强大的超声波振动使片材之间产生摩擦力，从而整合为密实的整体。

融合、凝固、黏合式打印机

3D打印机的第二个主要家族是由使用选择性黏合工艺的打印机构成的，这种工艺将原材料融化或凝固为层，许多早期的商业打印机使用的就是这种方法。需要指出，该方法的两种变体得到了广泛应用：SL（立体光刻）和LS（激光烧结）。

立体光刻

SL（立体光刻）是最早商用的3D打印方法之一。想象一下，一个装

有液体聚合物的小桶放置于公寓冰箱大小的打印机内部，打印机在一种特殊塑料的表面扫出一束激光。这种塑料是光敏聚合物，当其暴露于UV光下会硬化。每次激光扫描循着所打印形状的轮廓和横截面逐层进行。

每次激光扫描后，可移动的台面会将已打印的部分下沉1毫米。打印的部分下沉到液体中，新的光敏聚合物覆盖其顶部。有些SL打印机以相反的方式工作，激光向上瞄准聚合物，然后抬起（而不是下沉）打印的物体使其底部（而不是顶部）被新鲜液体浸没。

物体通过该方法3D打印出来后，还有其他工作需要做。多余的材料需要洗掉，有些物体表面还需要手工打磨，有时还要根据打印需求将物体放入紫外线“微波炉”中进一步固化。

SL打印的优势在于激光作业快速、精确。多束激光可并行工作，其分辨率比挤压式3D打印头更高。当今的工业级3D打印机可生产出精细的模型和零部件，层薄仅为10微米，比一张薄纸片还要薄。随着光敏聚合物原材料质量的提升，以及应用范围的不断扩大，SL打印机可生产出更多具有特殊材料属性的物体。



图5–5　UV激光循着连续的横截面形状扫描，被固化的部分慢慢地沉入桶中

图片来源：Solid Concepts Inc.

SL打印的缺点在于吸入未固化的光敏聚合物粉尘会中毒，而且光敏聚合物并不像工业注塑成型所使用的热塑性塑料那样结实耐用。由于维护SL打印机的激光器十分复杂且成本高昂，对于大多数家庭用户来说，

SL打印机过于昂贵。但是使用来自蓝光光盘的低成本UV激光器的廉价机器市场可能会有所增长。目前的SL打印机一次只能打印一种材料。

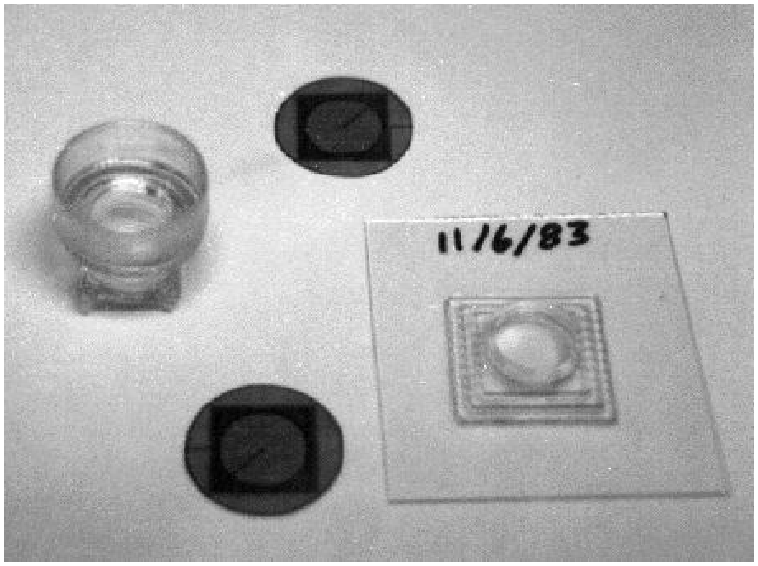


图5–6　这是世界上最早的3D打印成果，所用的SL技术可追溯到20世纪80年代

图片来源：Chuck Hull

激光烧结

选择性LS（激光烧结）由得克萨斯大学研究员卡尔·德卡德和约瑟夫·比曼于20世纪80年代发明。选择性LS使用类似于SL打印机的技术，所不同的是其不使用液态光敏聚合物，而是使用粉末。

和SL一样，很多人很难将LS打印工艺视为一种“打印工艺”。这种打印机以高功率激光束在粉床表面扫描，激光照射到的粉末融化，打印机内部的滚筒在粉床顶部刷上一层新的粉末并将打印台降低1毫米。

用粉末代替液体材料进行打印有其优势：一个用粉末打印出来的物体不太可能在打印过程中倒塌，因为未熔化的粉末可作为其内部支撑。在一些情况下，未使用的松散粉末可回收再利用。由于大部分原材料都可制成粉末形式，比如尼龙、钢、青铜和钛，因此粉末材料应用范围更广。

就缺点而言，使用LS打印机制造的物体表面往往不光滑、多孔。目前LS打印机还不能同时打印不同类型的粉末，不适合家庭或办公室使用。由于某些粉末若处理不当会引发爆炸，所以LS打印机必须使用氮气填充密封腔。



图5–7　一束激光正在熔融金属粉末，打印过程完成后物体最终被埋在粉末下

图片来源：Solid Concepts Inc.

最后，LS打印是高温过程，刚刚打印完的物体不能立刻从机器中取出。视打印层的尺寸和厚度的不同，大型物体可能需要一天的冷却时间。

三维打印

根据另一易混淆的命名惯例，3DP（三维打印）使用一种称作“三维打印”的工艺，其通过打印头将黏合剂或某种胶挤到原材料粉末中。3DP是在20世纪80年代由麻省理工学院的学生保罗·威廉姆斯和他的导师伊莱·萨克斯教授发明的。

那时，商业类增材制造系统使用激光或有毒的打印材料，而且整个系统体积有小卡车大小。早期的增材制造机器操作复杂且价格昂贵。由于3DP是个受欢迎的替代品，因此麻省理工学院在后来将3DP的相关技术申请了专利并授权给了几家公司（这些技术后来成为世界上很多商业类3D打印机的基础）。

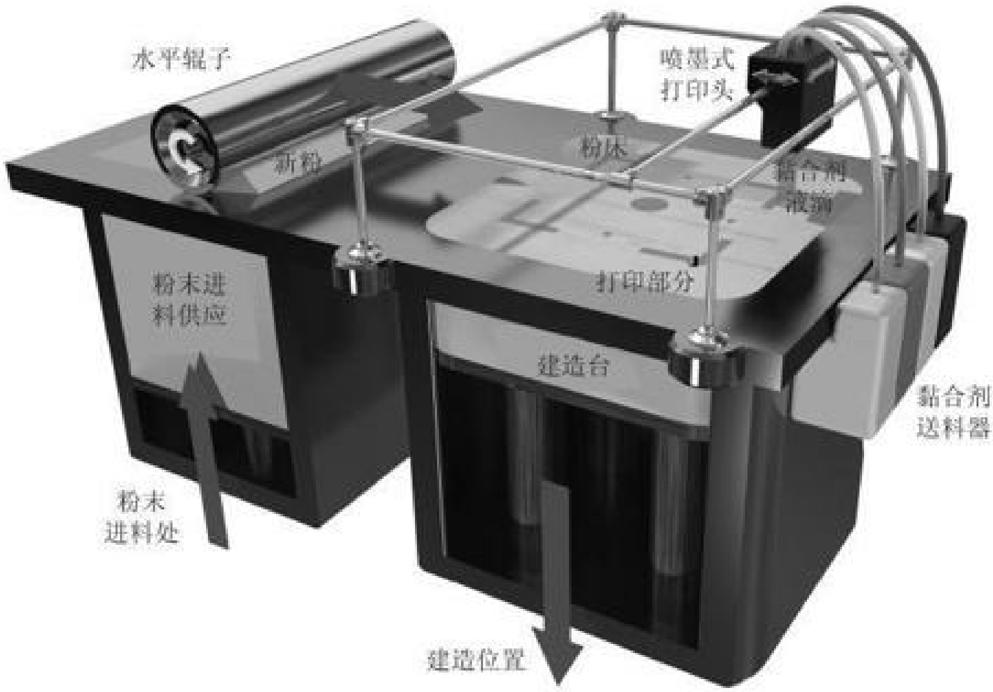


图5–8　彩色3DP工艺将彩色胶水喷至淀粉基粉床上，然后再涂一层新的粉末并重复此过程

图片来源：David McCarthy

3DP的突破性在于它的简单。保罗·威廉姆斯对于3DP的愿景相当大胆，特别是在当时那种技术现状下。保罗在他的硕士论文中写道：“台式机生产的目标是只需要按一下按钮就可以制造零部件，而无须其他操作。”他设想作为台式制造系统的3DP将是精确、快速、廉价和易于使用的。

今天，3DP已经实现了其创始人的愿望，成为一种流行的、成本低廉的3D打印方法。由于3DP打印机通过在原材料内挤入胶水生成层，所以并不需要激光，而且有很多原材料可以使用。3DP打印机不需要高功率的组件，因此其操作的能源效率高。不利的一面是它不用激光，从而很难制造出很薄的层，制造出的物体往往表面粗糙。

3DP突出的优势之一就是可以彩色打印。当胶水沉积时，一些附加的彩色墨水也会被喷入，可制造出全彩色三维模型。3DP可使用粉末状材料，从可生产出砂岩状纹理的淀粉状材料到需要在火炉中硬化的粉状陶土，都可以作为3DP的打印材料，还有一些3DP使用玻璃粉末、骨骼粉末、轮胎碎片甚至是锯末。有的打印机还使用青铜等金属粉末，胶合的青铜需要放入熔炉烧结成固体。

整理设计文件

打印过程开始于设计文件，像冰山的水下部分一样，还有大量的准备工作需要完成，包括准备设计文件和设置打印机。在我访问ABC成像公司时，约翰告诉我工作量最大（虽然经常不被视作挑战）的是帮客户将设计文件正确地转为可用文件格式。

设计文件必须可以和3D打印机的内置软件准确交流，打印机的内置软件（或固件）会告诉其机械组件如何操作。为3D打印准备一个完整的设计文件并不是一项简单的工作。

在ABC成像公司，3D打印过程开始于客户提供的设计文件，大部分客户是建筑师或工程师。大多数行业都倾向于使用专业设计软件，例如很多建筑师使用Sketchup进行设计。Sketchup是一款免费的、易于使用的设计工具，它在教育工作者、建筑师和初级设计师中很流行，工程师们喜欢用高端商用实体建模软件制作设计文件。约翰还经常与地理学家、外科医生或地图制造商合作，这些人的数据来源于光学扫描仪、远程传感器或医学图像。

3D打印过程中经常出现的挑战是需要弥补大多数设计软件在开发时并未考虑到3D打印所带来的问题，设计文件以各种令人眼花缭乱的文件格式发送过来，各具问题和挑战。在我访问ABC成像公司时，约翰告诉我："在二维打印时，如果文件制作糟糕或是毫无吸引力，只要点击'打印'，你仍然可以最终获得打印文档，虽然那并不是你想要的。"

约翰继续说："在3D打印中，不是输入糟糕的设计文件就能打印出糟糕的物体，而是你输入糟糕的设计文件，什么都打印不出来。在3D打印中，如果你得到的是糟糕的设计文件，那你最终什么也打印不出来，或是比什么也得不到更糟糕的情况就是浪费了昂贵的原材料。"

大多数设计文件（特别是那些复杂物体的设计文件）需要专家进行调整优化。"尽管人们谈论很多关于设计软件质量的问题，但设计文件制作者的技术才是核心问题。"约翰说，"一个杂乱的设计文件会拖延进度，因为我需要重做并对其进行修正。"

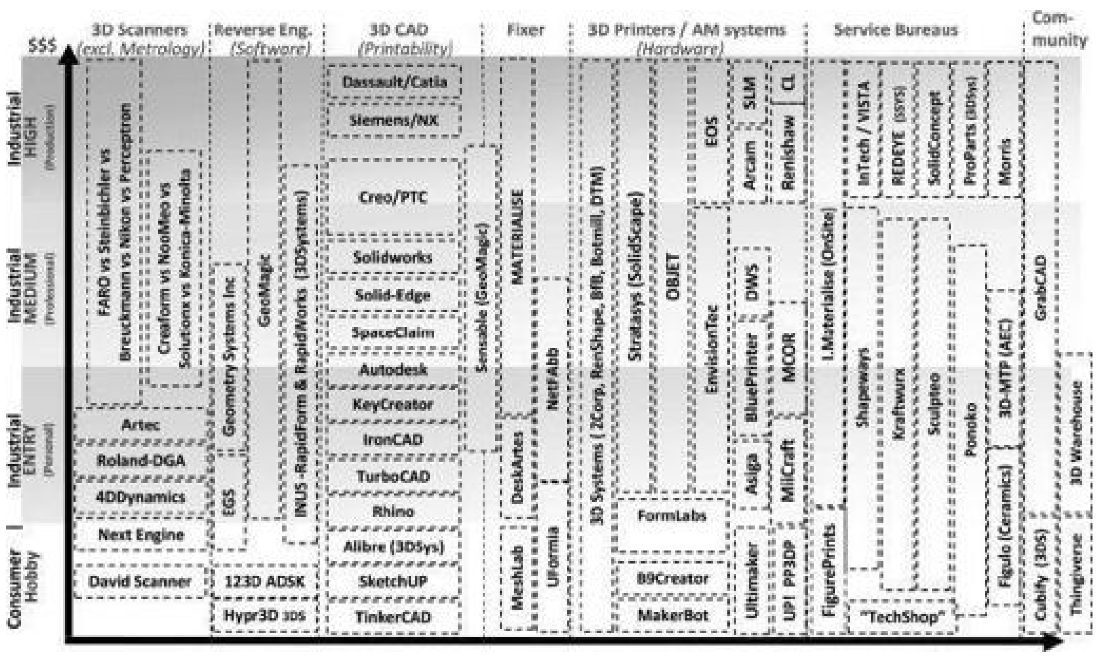


图5–9

注：3D打印世界是复杂的生态系统，它涵盖了软件和硬件的产品（开源代码的）、工具和应用，还包括为个人客户及商业客户提供服务。

图片来源：Tuan TranPham tuan@tranpham.com | @ ttranpham http://www.linkedin.com/in/ ttranpham

客户提交了他们的设计文件后，接下来约翰便会将文件转换为3D打印的特殊格式STL（标准镶嵌语言）。STL是一种业内标准的有着几十年历史的文件格式，它是由SL打印的发明者、3D系统公司的创始人查克·赫尔创造的，STL文件格式有点儿类似于PostScript文件格式，PostScript可将计算机文件转换为二维打印机能识别和处理的文件格式。

约翰说："我的大部分工作是质量控制，以确保STL文件正确运行。"当今的STL文件格式退回到了人们对3D打印机没什么要求的年代。STL文件的工作并不轻松，它的一生漫长而杰出，但却无法跟上先进打印技术和设计软件的步伐。

挑战在于STL文件必须将设计的复杂细节转换为直观的数字形式，而这很难传达到3D打印头。例如，工程软件是在机械通过切割制造物体而不是层层堆积制造物体的年代成长起来的。因此，体现着制造血统的工程设计软件仍然在学习如何增材制造而不是切割制造。

在设计文件转换为STL格式后，STL将设计对象的数字形状"包装"在虚拟的表面之内，我们称之为"网格"，其由成千上万（有时数百万）个连锁多边形组成。表面网格上的每个连锁多边形（常用的是三角形）都携带着物体的形状信息。在设计文件转换中，全部的设计表面包括物体

可以接触到空气的任何部分，不是工程师的人可能会对此感到些许困惑。例如，一个物体的表面设计既包括物体的外表面，也包括其空心处的内表面。

当STL转换完成，新包装的STL文件的虚拟表面必须是防水的，这有点儿类似于给物体涂上一层防水密封剂。一个防水的STL文件的表面网格可以精确而完整地覆盖和捕捉到设计表面的曲线和内部镂空。就像在密封防水麂皮鞋上的孔洞或缝隙一样，STL文件表面网格的缝隙将会在后续过程中引起问题。

一旦STL准备就绪，连接CAD和CAM的桥梁已经基本完成。即将进行3D打印的物体在完成表面防水网格包装后，还要为其最终阶段做准备：分层制造过程。在此STL文件将完成它的最后一部分工作，打印机固件读取STL文件，将数字网格“切”为虚拟的薄层，这对应着将来3D打印的物理薄层。

STL文件每个虚拟切片都反映着最终打印物体的一个横截面。还记得沿着咖啡杯底描出轮廓吗？该轮廓就等于STL文件中的一个单独的“薄片”的轮廓，也对应着一个单独的3D打印层。轮廓跟踪完成后，打印机需要进行光栅前后扫描以填满内部轮廓，就像填满着色薄中的所有形状。

有些3D打印机配备了内置可视化工具，可对CAD与 STL文件间的转换进行双重检验。未来，智能软件将可以确保设计文件打印出设计者的想象中的物体。同时，像约翰一样的专家将引导所有类型的设计文件由数字模型化身为坚固的、吸引人的3D打印模型。约翰说：“一旦设计文件准备就绪，最难的工作接踵而来。”

如果人们到目前为止所做的全部正确，当设计文件准备好后，打印机将开始自助活动。在打印机深处，微控制器和传感器（类似于纸张打印机的打印驱动）将告诉机器如何操作以确保一切正常。约翰说：“当你点击打印后，打印机可在无人看管的状态下全天候运行。”



图5–10　将打印好的物体从粉床上拣出并清理

图片来源：3D Systems

后处理：3D打印的最后工序

在ABC成像公司，打印过程以后处理来结束。当一项3D打印工作完成后，操作人员重新发挥作用。大多数刚打印完成的物体看起来并不光滑或没有完全成型。新打印的物体从打印机中取出后，需要进行一些人工的准备和清理工作，这个过程称作“后处理”。

在处理复杂的新打印对象时，就像3D打印的其他步骤一样，有其自己的学习曲线。新打印的部分在从机器中出来后可能很脆弱，约翰说：“学习曲线的一部分就是要打破很多东西，还有烧掉很多材料。”

突出的能力使得3D打印成为一种新的强大的塑型方式，而且它将塑型的复杂性转移到了设计和制造过程中。有很多细弱部分、环形或是镂空设计的物体打印起来是最棘手的，想象一下3D打印出布鲁克林大桥或是一个具有宽且薄平顶的建筑模型，那该有多难。

要打印出精致的交错网状结构，达到令人惊叹的效果，一名好的设计师必须考虑支撑结构。支撑材料是伴随着3D打印的持久材料，就像建设项目中的临时脚手架一样，支撑结构可在3D打印过程中帮助物体保持形状。一些打印机需要支撑结构，而另一些则依靠原材料粉末提供支撑，但有些设计者会增加额外的支撑结构应对增加的弹力。支撑材料会在打印结束后的后处理步骤中移除。

后处理的程度和形式由物体设计的复杂性决定，如所使用塑料树脂

的类型、对外表的要求。移除支撑材料会使用一些手工打磨、清洗或抛光的手段，根据用途某些物体会被打磨、喷漆或与其他物体焊接在一起。

3D打印催生原材料革命

对于弥合数字世界和物理世界之间差距，如果与设计文件之间的角力是一项挑战，那么另一项挑战就是将原材料变成设计者想要的形式。微小的彩色光点和快速的二进制指令构成了数字世界中的原材料，而在物理世界却不是如此简单和容易掌控的。

今天的3D打印机主要以塑料为原料，虽然塑料已成为低成本的代名词，但3D打印塑料却没那么廉价。事实上，塑料打印材料的成本很快成为3D打印机运行成本中的重要部分。

大部分3D打印机制造商会提供他们自己的专有材料。在ABC成像公司，约翰向我展示盛满打印粉末的存储桶时，他将3D打印塑料的成本比喻为“剃须刀和刀片”的商业模式，他说：“就像吉列，它免费赠送剃须刀，但你只能从吉列买到合适的刀片。”

工业3D打印技术已优化为配置特定厂商的3D打印材料，这一事实针对不同对象阻碍或推动了创新。不利方面在于用户担心制造商的保修服务无效而不愿尝试廉价材料。专属材料的有利方面在于3D打印机制造商将热衷于投资开发高性能的可盈利的原材料，这将推动该技术的进步。

未来，打印材料将包括活体组织或具有微小的计算能力，或具有超乎想象的性能。然而今天的大部分公司和打印爱好者只满足于塑料、金属、陶瓷、半固体食品以及混凝土和玻璃。

塑料是最常用的打印材料，塑料工程师把塑料分成两大类：热塑性塑料和热固性聚合物。它们之间的区别很容易记住，想象为奶酪与鸡蛋的区别。热塑性塑料像奶酪一样加热融化，但其内部结构并不改变，所以它们可以反复融化使用。而热固性聚合物像鸡蛋一样加热后固化，而且内部结构发生改变，因此只能使用一次，不能融化分解为可重复使用的液体。

大多数消费类3D打印机（通过打印头沉积原材料）使用一种名为ABS的热塑性材料，与乐高玩具的材料相同。大部分SL打印机使用光敏热固性聚合物，LS打印机使用热塑性粉末。

3D打印机也可以使用其他类别的塑料，比如软塑料，也叫“弹性体”，就像它的名字一样，这种橡皮筋似的材料具有多种弹力性能。这种材料有些可以从注射器中挤压出来然后风干，比如硅树脂。另一些柔

软有弹性的物体可以通过熔融一种热塑性弹性体来打印，就像制造硬质塑料的过程。

在3D打印技术发展早期，质疑者认为这种新技术无法在“真正的”制造机器中立足。为什么？因为那时的3D打印机还不能制造金属零件，现在的3D打印机可打印钢、钛甚至钨这样传统制造工艺很难塑造的硬质金属。

打印金属机械部件是3D金属打印的一种普遍应用，有几种可行的金属打印方法。一种方法是使用多步骤工艺，即首先在金属粉末上涂敷热敏塑料黏合剂，并使用激光选择性地将其融合。接下来，抖掉未熔融的粉末，将剩下的金属部分放置于热炉中烧掉塑料黏合剂。打印金属更直接的方法是通过打印头挤出熔融金属，或是直接用激光融化金属粉末。



图5–11　设计蓝图（上部）和使用各种方法制造出的零件及成本（下部）

图片来源：Robert MacCurdy

家用3D打印机还不能直接打印金属，但是这正在发生改变。消费类3D打印机（例如Fab@Home）可挤出凝胶与金属粉末的混合物。为了使打印凝胶在金属中更坚固，打印对象会被放在炉或窑中烘烤。显然，这个额外的窑烧步骤并不简单—它带来了缩水、开裂和变形的危险。

打印陶瓷具有与手工制作的窑烧陶瓷一样的光滑表面和内部材料性能。一个很有前景的应用是根据病人的CT扫描，3D打印出陶瓷骨植入物。陶瓷骨植入物可以定制，由于它们的孔较少，因此比传统植入物坚

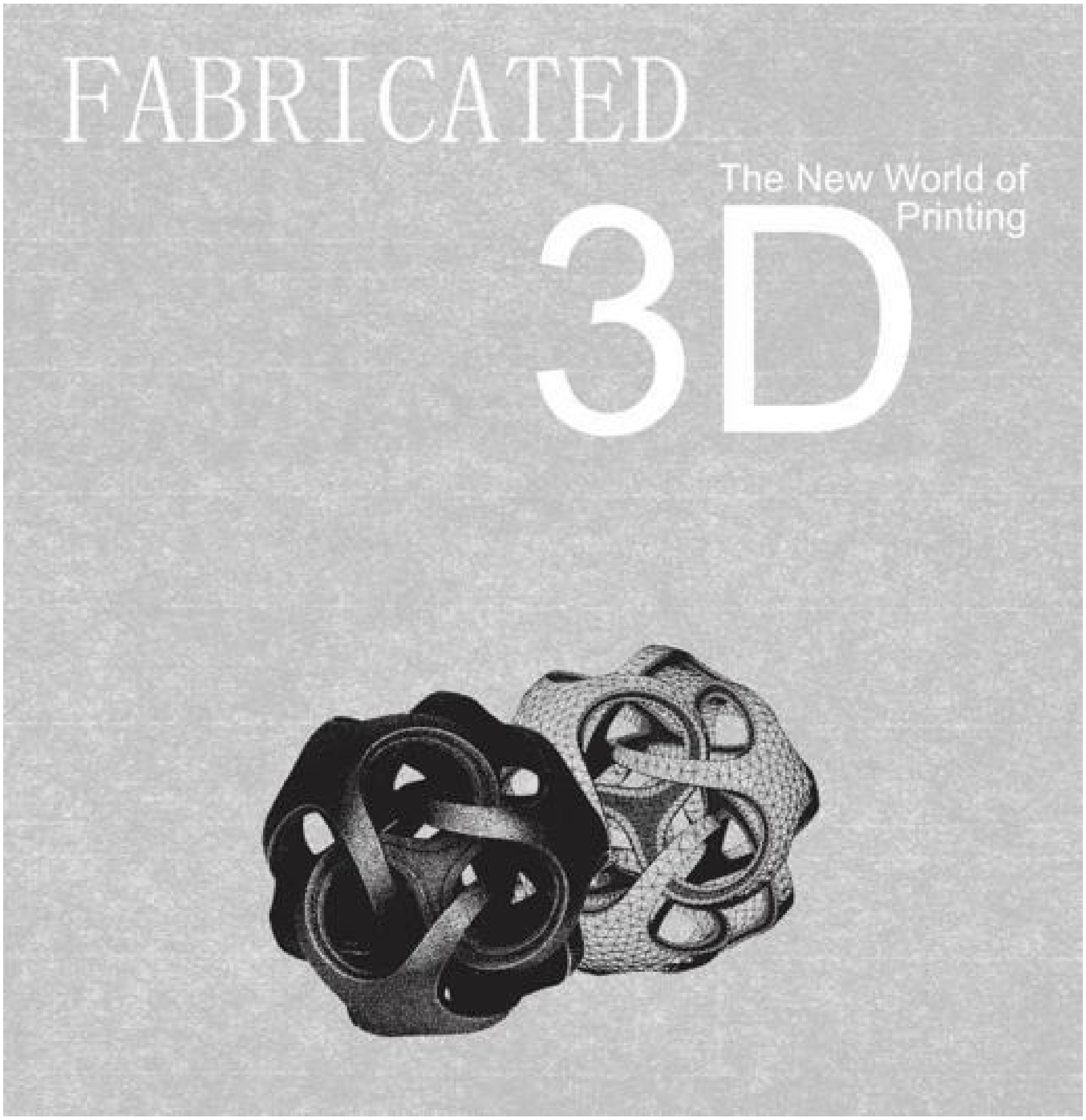
固3~5倍。强化的陶瓷骨植入物降低了手术过程中微型碎片断裂的风险，显著地降低了术后炎症发生的概率。

玻璃是人类文明最常用的材料之一，它是对3D打印最无吸引力的材料。玻璃是疏水性的，也就是说它排斥水，因此不能很好地黏附。玻璃粉末暴露于热量下会产生不可预测的结果。华盛顿大学研究生格兰特·马尔凯利和雷努卡·普拉巴卡以及杜安·斯托尔蒂和马克·甘特尔教授已经在实验室成功地使用再生玻璃打印了物体，然而玻璃打印的商业用途仍主要是艺术和珠宝打印。

随着技术进步，未来3D设计和打印过程将实现自动化而不再需要技术专家。关于3D打印领域有个内部争论，这让人想起半个世纪前关于“电视将进入每个家庭”的争论，当我们访问ABC成像公司，我问约翰怎么看这个问题。

“我认为未来3D打印机可能不会出现在每个家庭或办公室，我看到的是另一种未来，人们并不是提交给仓库订单以获得零部件，而是下载CAD文件并在他们附近的打印商店进行打印。”他补充说，“现在，我们离这种模式已经不远，快递员整天骑着自行车进进出出地为我们的客户送打印产品。”

第6章　设计软件：只要你能想到，就能设计和打印



设计软件塑造了我们的世界。几乎每个建筑模型、每件产品原型以及成品的背后都存在一个计算机设计文件。你此刻坐着的椅子、你办公桌上的订书机、你的汽车甚至你衬衫上的纽扣，所有这些东西在实际生产出来之前都是数字化的。可以说设计文件是现代工程的语言。

设计软件是3D打印的核心。正像基于纸笔的手绘图是维多利亚时代的造船者在建造过程中的指导工具，设计文件指导3D打印机如何打印。

从绘图文字处理器到**AutoCAD**

历史上第一个基于计算机的设计工具出现在20世纪50年代，当时研究人员和科学家们用它进行特殊的计算和基于计算机的原始模拟。早期的商业设计软件自20世纪60年代开始投入市场，售价约50万美元（由“数据控制公司”出售）。当我还是一名本科生时，我们很羡慕博士生能够使用运速快的CDC（通信设备类）主机。当时，这种巨型计算机呈现一个设计模型需要用1分钟的时间；而如今，你的手机1秒就可以呈现30个设计模型。

1982年，一家名为Autodesk（欧特克）的小型软件公司的首席执行官约翰·沃克给他的雇员们发了一份内部通知。在通知中他描述了对全新设计软件产品的愿景。他满腔热情地将这个新产品定位成将在微机上运行的低成本“绘图文字处理器”。大约在同一时间，身处几千英里外的查克·赫尔正在制造世界上第一台原始的3D打印机。

在与Autodesk雇员充分讨论之后，沃克将这个新的设计软件应用程序命名为“MicroCAD”（微型CAD）。如今，成本低廉的、基于台式计算机的设计软件大行其道。但在那个年代，这却是对未知将来的一次冒险。MicroCAD之所以被认为是一个全新的设计工具并不是因为它是设计软件，而是因为它可以在台式计算机上运行。MicroCAD最主要的市场吸引力在于它的成本低，不仅软件本身价格低，而且还为用户节省在计算能力方面成千上万美元的投资。

沃克希望MicroCAD成为这样一种设计工具：不仅可以提供和价格昂贵的竞争对手的产品相同的性能，而且成本要比竞争对手低很多。沃克写道：“与安装在70 000美元配置的计算机上的Computervision CAD（计算机CAD）相比，安装在10 000~15 000美元配置的台式机上的MicroCAD在性能和特点方面更具竞争力。”

在20世纪80年代，对于使用基于计算机的模拟程序测试机器部件的专业设计师和工程师来说，3D建模是最主要的途径。当时，微机还是一项不成熟的新技术，就像如今的家用3D打印装备一样。与大型机或早期的UNIX（一种操作系统）服务器相比，微机体积很小，缺乏运行复杂的工业设计项目所需要的能力。

在当时那个个人计算机知识匮乏的年代，台式计算机市场刚刚起步。那些后来通过销售个人计算机软件成为亿万富翁的人在当时连百万富翁都不是，而且大部分在高科技领域以外无人知晓。微软和苹果距离入围财富500强公司还差很远。比尔·盖茨那时乘飞机坐的还是经济舱。

当时，沃克的这家刚刚起步的软件设计公司是由兼职雇员组成的松

散组织。每个雇员每周至少需要工作14个小时，每年才获得1美元的薪水外加股票期权。

沃克的内部通知提到："当前，微机领域尚无知名的竞争产品（虽然苹果公司也有一些非常简单的屏幕绘图程序，但我们必须认真地向消费者讲解我们的产品与其他产品的不同之处）。" MicroCAD可以处理2D（二维）图形，并可用于建筑楼层平面图的创作，或许也能实现绘制蓝图工序的自动化。

几十年以后，事实证明，微软、苹果和Autodesk在微机上的冒险是正确的。作为20世纪90年代低成本桌面计算的弄潮儿，MicroCAD（现已更名为AutoCAD—欧特克）和其他商业计算机辅助设计软件树立了不朽的里程碑。如今，甚至连普通手机具有的计算功能和视觉显示功能也比20世纪70年代的大型计算机多。

如今，Autodesk是一个价值数十亿美元的全球性公司，其在全世界范围内卖出了1 000多万件AutoCAD产品。"绘图文字处理器"已经成为历史，现在的AutoCAD是3D建模领域功能强大的设计工具。

设计软件：以数字化的方式呈现物理世界

设计软件必须能够无缝地捕捉模拟物理世界的连续性和几何性本质，并将其缩减为离散的二进制单位。世界著名的物理学家理查德·费曼在他的回忆录中记录了如下一段对话，这段对话捕捉到了几何的非象征性、非言语性的本质：

> 有一次，我们在讨论一些事情，我们当时也就十一二岁。我说："思考就是跟自己对话。"
>
> "哦，是吗？"贝尼说，"你知道汽车曲轴古怪的形状吗？"
>
> "知道啊，你想说什么？"
>
> "好。现在告诉我：当你跟自己对话时，你如何描述它？"

费曼提出了一个很好的观点。人的心灵之眼将物理世界的形状、组成和行为感知为不同形状物体的无限连续集合，但将所有这些信息缩减为可以用来向别人再次有效描述的一组符号，毫无疑问是一个严峻的挑战。

设计软件必须将我们模糊而多样的物理世界缩减为精确、清晰的"语言"。早期的计算机在计算和跟踪符号（如数字或文字）上迅速超越了人类。然而，依靠已有的计算能力处理原始几何图形却花费了数十年的时间和大量钱财。

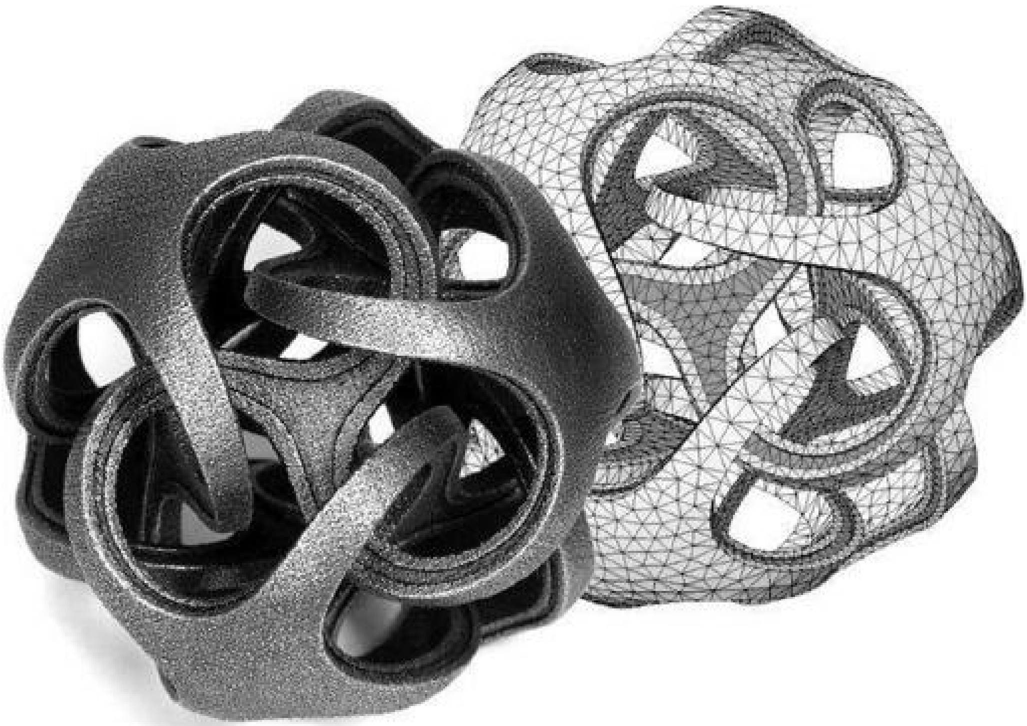


图6–1　文件（右）通过电子化的方式描述需要打印的物理对象（左），并按步骤引导打印机工作

图片来源：Bathsheba Grossman

基于计算机的设计文件用x、y和z坐标捕捉物理对象的形状。当描述一个简单的块状物体时，它可以精确地描述出它的高度、宽度和深度。但是，当描述一个形状较为复杂的物体时，例如一朵花，描述过程就会变得较为复杂。计算机用一系列成千上万的x、y和z坐标对“普通”的3D物理对象的形状建模。

当设计软件在用户的电脑屏幕上显示设计对象时，计算机处理器正努力地计算生成相应图像的数学方程。每当用户在过程中用鼠标点击设计图或者拉伸设计的边缘时，计算机都在迅速地进行一系列的计算，调整设计对象的x、y和z坐标。

跟踪由单一材料做成的简单立方体设计的变更并不是很难。然而，当物体为弯曲状或结构复杂时，跟踪起来就比较复杂。即使是一个高度和直径都很规矩的圆柱体，也需要做大量的计算以便准确展示所有曲线和阴影的美感。对于一个创建装饰讲究的金属散热器的设计项目，设计文件将跟踪大量的x、y和z数据点，以便描绘金属散热器表面的所有曲线、镂空和边缘。

20世纪90年代，当普通的公司和小型工程企业也可以负担得起设计软件时，工业设计发生了永久性的改变。与模糊的历史记载情形或者手

工绘制图不同，设计文件可以被锁定，文件内的知识可以牢牢地、准确地被记录。设计文件可以即刻被发送到地球的另一端，其接收人可能是一个陌生人，他不需任何参考和提示，仅根据原始的物体设计就可以研究、保存、修改或3D打印他接收的设计文件。

设计软件可以自动完成设计工序中的烦琐环节。文字处理软件可以减少对时间以及打印文件所需纸张的浪费。设计软件减轻了重复设计的痛苦。设计者可以快速地在屏幕上重复设计，也可以返回到之前的设计。你可以轻易地将某一部分的设计复制并粘贴到另一部分来试验表面的纹理和颜色。设计软件会跟踪每一个设计版本，其存储的数据点比人类能够记住的数据点要多。

你还记得如何使用纸笔绘制一个立方体吗？如果你的立方体设计很简单，使用纸和笔就能绘制得很好了。但是，如果你想在设计上做一些试验，并添加一些创意，事情就变得麻烦了。

我记得我上小学时，如果在绘制立方体时出错了或是想改变设计，我会使用橡皮。如果我在边角处应采用清新而明亮的黄色而非灰色，但发现得太晚时，我会在一张新纸上用一支黄色的铅笔重新开始。即使是重复简单的设计也会浪费纸张和时间，这样也就增加了挫败感。如果我的老师要求我在立方体上添加一些表面纹理或勾画一些内部通道，这些看似简单的附加设计就远远超出了我的能力。

我第一次接触设计软件是高中时为图形设计写代码。上大学时我找到了一份兼职工作，帮助一家荷兰制造商在计算机上设计简单的钣金件。他不得不请一个经验不足的大一新生帮助他做这项工作，可见在那个年代会使用CAD的专业工程师可谓凤毛麟角。我的同学居伊·沙维夫和我一起写了个简单的程序，用来勾勒出钣金件的轮廓，就好像它是由纸做的，无须考虑其实际物理厚度。

我们的想法是，当设计文件到达工厂以后，生产一线人员再输入钣金件的实际厚度。相应地，工程师的设计会自动调整。这是一个很简单的想法，与如今的实时、逼真、全景的动画设计比起来相距甚远。但是，我的指导老师摩西·什皮托尼（Moshe Shpitalni）很有先见之明，他预见到CAD不仅仅是改善设计本身这么简单。

设计软件可以实现制造工厂的各个部门之间的无缝沟通。我们的程序使制造商放宽采购标准，与传统的“固定”的蓝图相比，可采购原材料的范围更广。该软件获得了巨大的成功，最终卖出了400万美元（其中我和我的朋友每小时得到2.5美元）。

后来，我在20岁出头时，到海军服役，我们部队有一个特殊的蓝图部门。这个部门设在一个光线充足的房间里，在这里，训练有素的绘图

员在桌面倾斜的绘图桌上辛苦地绘制船舶的船体、引擎和其他部件的详细蓝图。

我和我的指挥官游说上级，使其将3D设计软件引入海军工程单位。最终，我们成功了，但这确实不是一件容易的销售工作。这些绘图员之前已经花费了许多年学习传统的绘制方法，仅有一些新入伍的士兵愿意重新开始学习如何使用基于计算机的设计工具。然而，甚至连之前最排斥的绘图员最终也意识到使用设计软件不仅可以提高效率，而且可以进行重复设计，其内置的计算与预测能力是任何人类绘图员都无法企及的。

海军结构工程师可以很快地在他们的计算机上勾画出水箱的形状。然后，根据后勤部门的反馈信息，快速地通过数字化的方式改变水箱的容积。实际上他们几乎可以“称”出水箱的重量，并确定它的制造成本。最重要的是，计算机可以计算出不同形状和尺寸的水箱对船在公海上航行的稳定性造成的影响，而如果就这个问题请教专家的话，通常需要一个多星期才能得到答案。

设计软件的伟大之处在于，它以数字化的方式呈现了物理世界，将自动化的所有优势都注入设计工序里。设计软件的不足之处在于，即使在今天，它仍然不能通过数字化的方式捕捉物理对象的全部本质。计算机可以很好地预见一系列有限数量的元素，例如计算两名国际象棋棋手可能走出的全部不同棋步的组合。然而，将物理世界分解成一系列有限的可能性并不是一件容易的事情。

让一切皆为可能：设计软件与3D打印的结合

设计软件和3D打印技术的共同飞跃改变了人们设计与制造物体的方式。然而，这二者之间的关系在向着单边发展。3D打印的进步依赖于设计软件，设计软件的进步并不依赖于3D打印。事实上，设计软件现在才开始认真地把3D打印作为一种可行的设计媒介。

设计文件可以对3D打印机提供的指导仅限于此。如果我们要通过3D打印制作“真实”的岩石、功能齐全的机器人或是新的肾脏，设计软件的功能将需要进一步加强。大多数大规模生产的物体都是由单个生产的零件组装在一起，而不是被整个生产出来的复杂件，设计软件不能映射出物体表面之下的具体结构。因此，物体的内部结构对于典型的计算机（和设计软件）来说仍然是鞭长莫及的。



图6–2　使用Autodesk Inventor软件3D打印出来的涡喷发动机实体模型

图片来源：Gonzalo Martinez, Autodesk

如今，用于3D打印的设计软件主要分为两类。第一类设计软件被称为“实体建模”，其使用者为工程师和工业设计师。实体建模为用户提供了一个由现成的立方体、圆柱体、球体和其他标准的物理形状组成的形状库，只需点击几下鼠标就可以将这些形状剪裁、拉伸或是组合在一起。提供这个现成的形状库是为了可以快速地启动设计工序。通过使用形状库，用户可以将这些预先设定的形状调整和改变为独特的设计。

第二类设计软件被称为“曲面建模”，最早被卡通动画师所采用。最近，视频游戏和图形公司也开始采用曲面建模。当用图形库中现成的形状无法满足卡通形象或想象世界的设计需求时，曲面建模就有了用武之地。

设计机器零件：实体建模**CAD**

实体建模软件诞生于工业设计和制造领域。实体建模设计包非常有效，它为用户提供了一个现成的内置核心形状库和标准机器零件的几何形状，可以实现快速的定制和组合。例如，你可以合并两个圆柱体使之成为一个木槌，也可以在另一个圆柱体上钻一个孔，把它挂在墙上。由于实体建模软件体现的是不同体积构成的形状，这与当今大多数3D打

印机有异曲同工之妙。

实体建模设计软件凝聚了多年的制造与设计经验。软件的“对话”使用一些很老派的机械加工车间词汇，如挤压、钻孔和去角。它通过可识别的真实形式进行设计操作，例如，钻孔、磨切口或者磨光的边缘。

实体建模软件在20世纪90年代面世，那时计算能力刚刚可以做到让设计软件“记住”以前设计中重复的内容，允许用户来回查看这些重复的设计，撤销已做出的更改，以及回过头来更改尺寸。如今我们想当然地认为计算机会记得同一文档、电子表格或设计文件的每一个版本，但在最开始的时候并非如此便捷。当设计软件最终具备这种能力时，CAD浪潮开始席卷全球。参数化建模确保了设计者可以不断编辑和验证他们的设计，而无须使用铅笔、橡皮或是撕掉作废的纸张。

设计软件简化了工作流程，改善了沟通，使得企业可以存储设计知识。在设计软件成为制造工序中的关键组成部分之前，设计师、工程师和制造商松散地联系在一起，而不是一个有组织的整体。如今，实体建模工具会告诉使用者，他们的新产品设计方案能否通过特殊的环保塑料注塑机完好地生产出来。设计软件可以帮助设计师削减单独部件的数量，节省制造和组装成本。

如今的商业化CAD软件包可以融入公司的供应链。如果工程师要更改一个关键发动机部件的大小或者材料组成，他们可以通过检查公司的库存变化比较新部件与现有部件。如果一个新部件被添加到库存中，它对其他部件产生的影响将会被记录下来，整个供应链将得到通知并被更新。

绘制屏幕上的字符：**3D**计算机图形软件

如果说实体建模适用于工程师的话，那么曲面建模设计软件则在动画师和插画师中生根发芽。曲面建模软件起源于娱乐界，包括卡通、电影和视频游戏产业。如今，科学家们使用3D建模软件创建DNA（脱氧核糖核酸）结构或化学合成物质的模型。建筑师和园艺师设计精美的模型卖给潜在客户。

如果说一台计算机需要x、y和z的位置坐标跟踪一个物体的形状，那么它是如何成功捕捉动画人物或复杂分子的细节呢？曲面建模通过数字化“包装”由规则的多边形构成的虚拟网捕捉世界。曲面建模有时也被称为“多边形建模”，组成虚拟网的每个多边形都对应着虚拟网格上的一个数据点。

每个数据点由设计软件存储，以便于设计师使用。如今，大多数3D模型采用三角形的表面网格来构建，因为这种结构很灵活，而且计算机

易于处理这种信息。无论曲形图层表面如何精细，三角形终究是平面的，而不是曲面的。

曲面建模软件的伟大之处在于它可以描绘宇宙的多样性。曲面建模软件可以描绘出电影和视频游戏中美丽的虚幻世界。摆脱了原始的块状和球状的限制，曲面建模关注的是如何表现曲面的表层活动，而不是机器零件如何组装到一起，因而，曲面建模软件是平面设计师的白板。在此基础上，艺术家可以进一步增添更多的细节，如光泽的表面、纹理、逼真的皮肤和头发以及一望无际的荒野。

但是，曲面建模软件也有它自己的负担。图形动画需要在屏幕上顺畅地移动，看起来逼真。如果光线照在一个人物上，光线就必须随着人物的动作而流动。背景必须以正确的速度通过。跟踪这些微小细节的过程被称为“渲染”。

高速渲染可以带来高度逼真的视频图像。渲染依靠内置在设计软件中形成实时移动的算法。在运行高速渲染时，曲面建模软件极大地耗费计算机资源。用曲面建模软件创建3D打印设计是可行的（例如，3D打印视频游戏中的虚拟化身是一个很流行的应用）。然而，正如我们前面提到的，只打印表面形状是不够的。为了适应曲面建模，3D打印设计还需要采取一些额外的步骤。

在现实中，大多数现代化的设计工具都既可以做实体建模，也可以做曲面建模。通过生成设计物体的虚拟网格，可以轻易将实体建模转换成曲面建模。但是从虚拟网格转换成实体建模仍极具挑战性。就像从音符转换成MP3（一种音频压缩技术）声音文件是比较容易的，但反过来却很难。科学界已经花费了很长时间试图解决这个问题，但它在计算方面仍然是一个难以攻克的命题。

编辑物理世界就像编辑照片一样

用光学扫描数字化地描述物理对象正变得越来越流行。不久前，扫描指的是将一份纸质打印文档或者照片变成一个数字文档。如今，人们可以扫描建筑项目中的建筑物正面，或使用核磁共振扫描疼痛的肘部以找到扭伤的韧带。

扫描数据通过一组三维坐标描绘物理世界的形状和规模。扫描数据介于实体建模软件设计的原始形状和曲面建模软件中包装数字对象的虚拟网格之间。试想如果你把胶水浇到自己身上，然后在一大堆五彩纸屑中翻滚，结果会怎么样。当你站起来时，纸屑会粘满全身，你的身体牢牢地粘着密集的五彩纸屑。

假如有人看到这一场面会认真耐心地记录粘在你身体表面的每张五

彩纸屑的精确位置。也许第一次尝试时他会耐心地采用描述的方法记录下每个纸屑的位置，例如“鼻尖上有一个红色的纸屑”。按照这种方式辛辛苦苦记录下来后，记录者会发现一种隐藏在五彩颜色背后的更高效的纸屑位置记录方法：根据其在空间的精确位置或依据x、y和z坐标快速记下每张小纸屑的位置。

这从本质上解释了扫描仪如何捕捉物体（如数字纸屑的表面涂层）的物理特点。每个数字纸屑代表了一个数据点。每个数据点包含三维空间中每一个小点在你身体表面的位置信息，以x、y和z坐标的方式记录。

粘在我们身体表面的数字纸屑也可以称作“点云”。大多数扫描仪数字化地采集点云，然后将数据反馈给计算机。扫描后的数据会被上传给设计软件，为了解收集的位置坐标信息，设计软件通过一系列快速计算将点云转换成表面网格，有时会计算丢失的数据点来填充表面空缺。

3D打印和点云简直是天作之合。扫描数据开辟了设计新领域，并释放出3D打印的巨大潜力。对于没有设计文件的对象来说，扫描对于捕捉其几何形状是有用的，例如天然的物体（如植物、动物、人、解剖模型）以及无生命的物体（如石头甚至风景）。当原始的CAD文件不可用或者根本不存在时（如考古对象和破碎的部件），扫描对于捕捉合成对象的形状也是有用的。

在我看来，扫描数据是跨越模拟物理世界和二进制数字世界鸿沟的桥梁。原件与副本、受版权保护的对象与衍生作品之间的界线已逐渐模糊，扫描和复制的物理对象就处于这个灰色区域。一旦设计文件捕捉了扫描数据，这些数据就可以被编辑、复制和复印了。

总有一天，我们编辑物理世界变得像编辑数码照片一样容易。

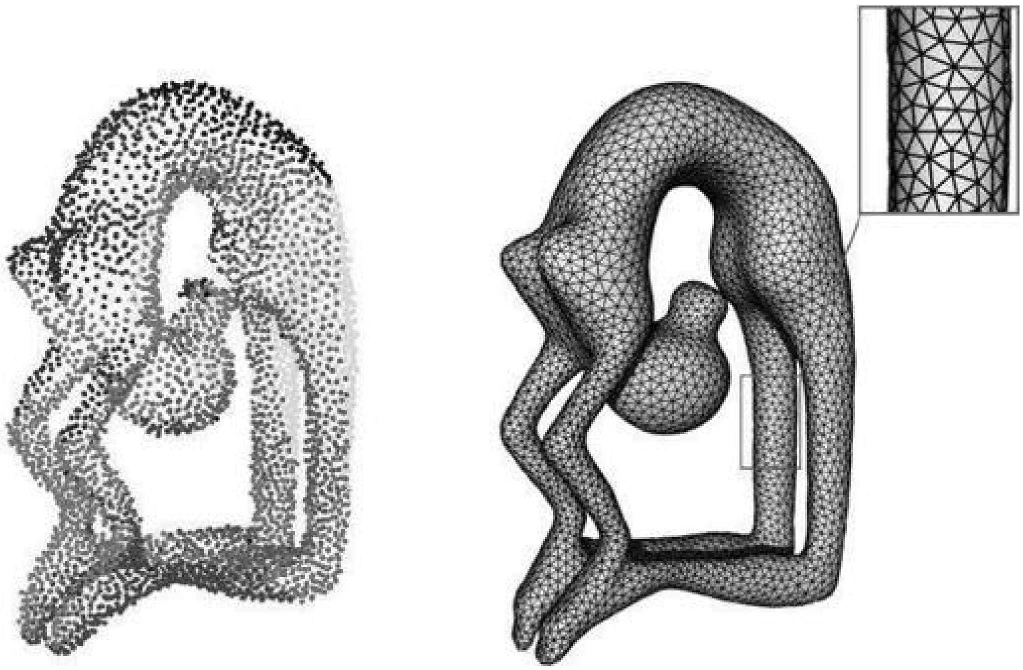


图6–3　点云数据和相应的表面网格

图片来源：Ligang Liu, Zhejiang University, China

瓶颈在于计算能力以及缺乏足够智能的算法填充空白以完善数字点云的细节。计算机并不一定了解它扫描的内容，所以你不能只扫描一个花瓶然后要求计算机将花瓶的瓶壁做得更厚一点儿，因为计算机不知道哪里是瓶壁以及哪个方向需要“更厚一点儿”。与其他的数字化软件工具一样，光学扫描的数据不能捕捉一个物体的内部结构。光学扫描数据像其他数字化软件工具一样不能捕捉物体的内部。目前改进的医疗成像技术，如CT（电子计算机X射线断层扫描技术）扫描仪、核磁共振成像和超声波检查，正在改变这种情况。

设计软件的未来

现代软件设计仍然不能摆脱它的起源—它最先在制造业和动画领域使用，这些领域最近才开始关注3D打印。具有讽刺意味的是，同样的设计工具（旨在处理有限的计算能力以及节省时间、金钱和提高知识转移）对能够3D打印的对象仍然存在限制。其结果是设计文件没有描绘物理对象的内部细节（至少没有很多额外的自定义工作），设计软件也没有图形化地建模以及预测不同材料的复杂混合。

例如，实体建模软件的标准程序库中的原始形状不能被编辑成不规则几何形状。可是3D打印机却可以制造出传统制造机器无法生产的独特的不规则形状。因此，很大的设计潜力有待挖掘。实体建模软件无法满足新的、大量未开发的设计空间的需求。随着3D打印技术的不断提高，传统的实体建模这个有用但有些简单的设计工具将会过时。

动画师和视频游戏设计师使用的曲面建模软件具有与实体建模软件类似的局限，即缺乏描述对象内部的设计数据。如果你设计并尝试3D打印出一个外形精巧并带有生动有趣图案的多彩茶壶，打印出的茶壶其外表看起来可能棒极了，但却没有实用性。因为你的设计文件没有指定茶壶内腔的形状，壶嘴也不是空心的，盖子也无法严丝合缝地盖上，你的3D打印茶壶没有任何内部结构、无法使用。

即使是精心设计的最详细的3D图形设计也不能引导3D打印机打印出曲面下面的对象。想想曲面建模软件的起源，就可以理解为什么存在这种限制了。卡通动画师从来不需要3D打印他们的“设计文件”。一些专门的软件就能“辨别”曲面下面的形状，并且可以补充丢失的细节，但这个过程往往容易导致错误和失败。

打印出物体内部只是其中一个挑战，另一个挑战是3D打印技术能够制造非常复杂的物体，而设计这些物体涉及的数据点超过了如今计算机的处理能力。例如，设计和3D打印一件由上百万混合塑料（硬塑料和软塑料）精细衔接而制成的衬衫，打印出的面料质地恰恰符合你的身体。

采用了实体建模程序，你会发现定义一个单环的锁甲又快又简单。然而，制作以及环环相扣上百万个这样的小环将极其烦琐和费时。如果你为每个特定的锁甲的连接处指定一种塑料，计算机系统将崩溃。即使计算机可以跟踪使用所有类型的塑料，当今任何传统设计工具也不能3D建模你所完成的锁甲设计。



图6–4　手部CT扫描

注：这只手是直接3D打印的，无须将扫描数据转换成表面网格或STL文件。

图片来源：Daniel Dikovsky, Objet Inc.

3D打印正朝多种材料的趋势发展，而设计软件还没有准备好登上这个竞技场。可以同时使用几种材料打印使得设计人员能够以全新的方式结合材料，这对于传统制造业来说是不可能的。多种材料打印不仅使人们有可能在一次打印作业中制造出复杂的多部件物体，还可以产生全新类型的材料，例如，可以从一种类型逐渐转变为另一种类型的梯度材料。

然而，目前面临的挑战是设计软件还没有准备好“考虑”多种材料。用钢或者钛制作一个齿轮模型是一回事，而制作一个内部是轻钛材料、外部是淬火钢的齿轮模型完全是另外一件事。一些3D打印机已经可以制造如此复杂的由多金属组成的齿轮，但还没有能够执行这个任务的设计软件。

当不同类型的材料以新的方式相结合时，另一个困难出现了。有时候，随着打印对象形状的变化，材料的性能也发生显著的变化，这就增加了如今的设计软件都不能处理的复杂度。把不同类型的材料组合成一

个打印物体带来很多新的设计可能性。不过，在设计软件满足挑战之前，这些可能性仍然无法探索。

当一个设计部件有复杂的功能并由多种材料组成或涉及上百万精致又不同的设计曲面时，其设计文件一定会占用大量的内存。这就是为什么现代设计软件还不能准确地描绘出由细胞、神经末梢和血管结构组成的有血有肉的手的详细模型。

把设计的东西完美打印出来

从设计文件转换为可打印的对象使CAD和3D打印之间长期的单向关系变得明朗。作为响应，制造并使用3D打印机的人发明了工具使设计文件能够按照计划打印出来。一些软件工具（如Materialise Magics和Netfabb）被用作“修复”工具，帮助用户找出他们的设计文件存在的问题。

我们想简单地说说3D打印另外一个软件相关的方面：STL文件。（还记得ABC成像公司的约翰·T·李吗？）为了准备客户的设计文件，约翰将文件转换成STL格式。从设计文件转换到3D打印机这一过程中，STL文件发挥了举足轻重的作用。

STL：目前的标准

标准和文件格式是技术通用语，是互操作性的重要基础。例如，MP3文件格式使得每个人（包括音乐播放器的制造商和消费者）都可以交换、出售、购买和下载音乐文件，这成就了今天的音乐产业。类似的行业标准文件格式是其他形式媒体的广告特色：所有的数码相机照片都被保存为JPEG格式（一种流行的图形文件格式），因为这样可以与激光打印机和网络浏览器兼容。

3D打印机领域有自己的行业标准文件格式，即STL文件格式。STL文件格式始于20世纪80年代，在那个年代3D打印机是全新的原型工具，而设计软件和计算机已经和如今一样小巧。像如今受限于内部效率低下的设计软件一样，STL文件格式的目的是简化从设计文件到初露锋芒的3D打印机的转换。

为了将一个设计文件数字化“切片”成可以3D打印的格式，早期的STL文件不得不接受3D打印机只能处理这么多物理细节的事实。那时，计算机内存有限并且昂贵。STL文件格式会删除一些设计细节，这非常理想，因为这样能够节省计算能力。例如，设计文件可能包含颜色信息和一些细微的设计差异，而STL文件会把它们都去掉。一个典型的3D打印机只需处理当前层的三角形，可以暂时忽略其他层，直到制造下一层。

30年后的今天，STL文件最初的优势可能已经成为3D打印的限制因素。如果想让3D打印发挥它的潜力，几十年来一直有用的STL格式需要光荣地退休了。设计软件正在逐步改进，3D打印机同样如此。

如今的设计软件通常能够处理涉及数十亿位置坐标或复杂网格的设计文件。与此同步，如今最好的3D打印机正在快速地接近1微米的打印分辨率。然而，STL文件（跨越这两种技术的重要桥梁）却跟不上步伐。

增材制造：新标准

更换和升级STL文件的一个可用的方法是采用基于XML（可扩展标记语言）的新标准—AMF（增材制造格式）。开诚布公地讲，AMF标准是我与其他人一起合作开发的，我理所当然支持它。我与一群3D打印机制造商、CAD软件供应商以及专家级用户一起开发了AMF标准。我们成立了一家国际机构开展合作，该机构负责技术标准（美国材料与试验协会颁布）的制定和实施。

AMF保留了STL格式的曲面网状结构，但新增加了功能来反映设计软件和3D打印机的先进性。例如，AMF文件格式可以处理不同颜色、不同类型的材料，创建格子结构以及处理其他详细的内部结构（这正是增材制造的巨大优势之一）。与STL采用的平面三角形相比，曲面三角形可以更准确、更简洁地描述曲面。

2010年5月标准机构正式通过AMF标准，但对一个标准的最终测试是其能否被广泛地采用。在写作本书时，该标准尚未被3D打印厂商所采用。这个过程可能需要数年。我们正踯躅于鸡和蛋的悖论：CAD厂商和3D打印公司都等着看是否有人愿意在新格式上赌一把，而放弃又老又乏的战马—STL格式。

下一代的设计软件：数字化捕捉

如果说第一代主流设计软件经历了桌面计算和传统制造业的浪潮，新一代的设计软件则经历数字化捕捉或“现实捕捉”的浪潮。设计软件的市场化未来是要让任何人都可以实现现实捕捉。软件公司之间的竞赛就是看谁能够捕捉消费市场。Autodesk（20世纪80年代推出绘图软件MicroCAD）希望屹立于下一个大的改革浪潮之上。Autodesk致力于创造123D（一款CAD工具），这是一套针对儿童和消费者的免费设计工具。

其他CAD公司（如SolidWorks、PTC、犀牛和SketchUp）为从事设计类的消费者构建模块。然而，像任何已经在成熟领域有一席之地的公司一样，软件设计公司面临的问题是很难缩小差距。一方面，公司必须利

用其组织资源捕捉到这个新的市场机会；另一方面，公司必须继续保持其核心生产力引擎，该引擎为99%的传统制造业服务并为公司带来收入。

“未来的设计软件会使现实与软件之间的转换更加容易。”Autodesk公司大众产品部门的副总裁贡萨洛·马丁内斯说，“我们的目标是要加快该过程。我们现有的工具可以捕捉一个物体上亿个数据点的物理细节。我们的目标是使人们更容易地操作这些数据，以便从人的角度了解并且回答这个问题：‘那个物体是什么？’”

“我们正在探索新的方法来设计和制造东西。”贡萨洛说，“去年，我们建立了一个国家级艺术加工实验室。现在，我们拥有西海岸最多的3D打印机收藏品。”

如果捕捉物理对象的设计细节成为一个快速而轻松的过程，那么每个人都可以成为设计师。一旦3D打印无处不在，每个人都可以成为制造商。“我11岁的儿子设计了一个复杂的物体，而我曾花了3年时间学习如何设计这个物体。”贡萨洛笑了起来。

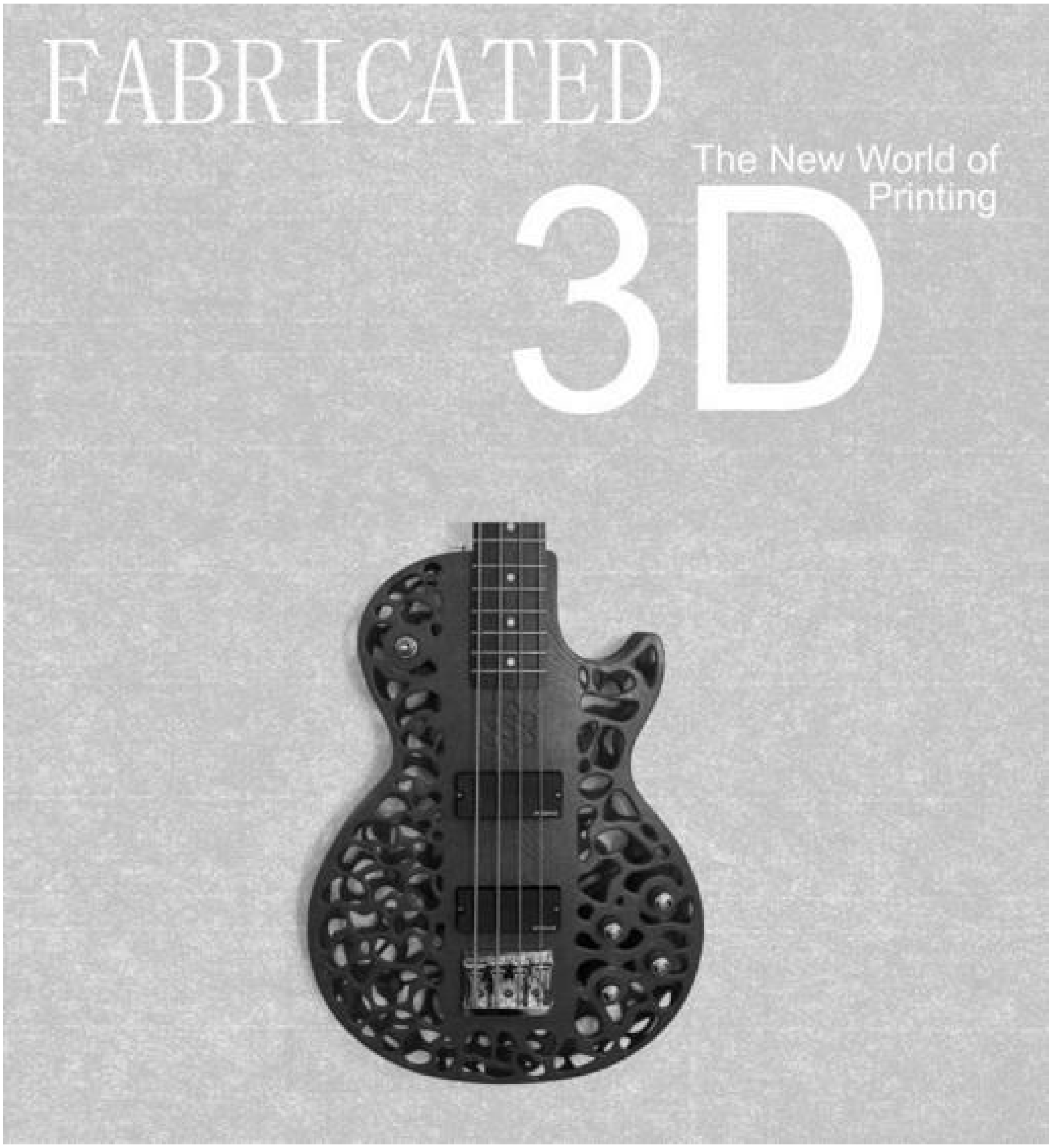


图6–5　这个3D打印的头骨被123D Catch软件以数字的形式捕捉

图片来源：Josh Mings

贡萨洛说：“我们的长期目标是从点云数据生成参数（形状库）。这对逆向工程来说很好，如果我们要以数字形式复制或改变对象，它可以加快设计过程。简单地说，下一代设计软件将快速地把现实带到计算机中。”

第7章　“活墨”生物打印：人体器官可以打印了



在2011年的TED（技术、娱乐和设计）大会上，威克弗里斯特大学研究员安东尼·阿塔拉的出现引起了不小的轰动，人们以为他要演示如何打印一个真实的人的肾脏。人们对此兴奋不已，因为器官移植名单上90%的患者都在等待肾源。然而，随后证实，通过3D打印技术打印出鲜活的肾脏仍然处于早期研究阶段。“肾脏打印”实际上是一项实验室里的实验，其中涉及通过3D打印技术打印出具备过滤血液与稀释尿液功能的类似肾脏的组织。

阿塔拉在TED大会上的演示让人们意识到通过3D打印技术打印身体

部位的可能性。阿塔拉作为再生医学的长期推崇者与生物打印的研究先驱，一直对此持乐观态度。在接受一家大型金融公司的采访时，阿塔拉说：“毫无疑问，有一天—也许通过一代人的努力，你可以拥有一个由你自身细胞组织制造的心脏，这是不是很神奇？”

3D打印：让你一夜之间年轻20岁

莎士比亚曾将暮年比作“可怕的冬天”。许多文化中都有讲述神秘的“青春之泉”让人青春永驻的故事。在一篇中世纪的小说里，“青春之泉”的治疗神力可以让年迈的士兵变为年轻的战士。

> 当最小年龄也已经46岁的老战士们在“青春之泉”中沐浴后，他们都变成了30岁的小伙子，就像是最为出色的骑士。其他老人们见状说：看我们（和你们相比）是多么苍老、多么虚弱啊？我们已经活了100多岁，而现在我们正以崭新的姿态出现在你们面前。他们按照指示进入“青春之泉”并沐浴了四次，出浴时欣喜若狂，当他们回去拜见亚历山大大帝时，他几乎无法认出他们，他们是那么年轻。

尽管经过几百年的探索人们还未找到“青春之泉”，但是在现代社会中，人们正在不断地探索外科整形、关节置换、心脏瓣膜更新、具有奇效的维生素补充剂与护肤霜。3D打印技术也许可以终止这些探索。打印所需的身体部位将帮助那些需要器官移植或已失去关节的人。收入较多的人可以定制身体的某个部位，以便从事喜爱的休闲活动。到2072年，国际奥林匹克委员会将需要决定是否禁止拥有生物打印器官的运动员参加比赛。

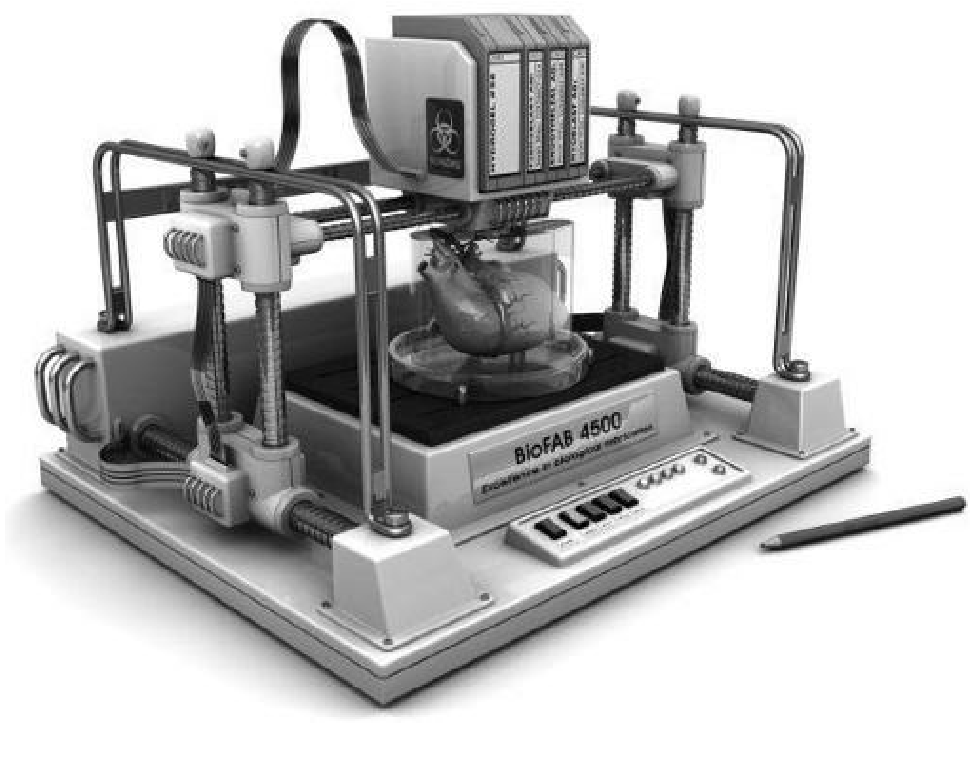


图7–1　生物打印的要旨是通过多种细胞和生物材料3D打印功能器官
图片来源：Christopher Barnatt, ExplainingTheFuture.com

今天，3D打印某个身体部位仍然处于构想阶段，打印活性组织对于假设出来的漫长的“3D打印生命阶梯”来说只是一个开始。

想象一下把身体各部位根据复杂性排列成一个很高的阶梯。无生命的假肢会位于阶梯的底层；中层将是简单的活性组织，如骨与软骨；简单组织之上将会是静脉和皮肤；最靠近阶梯顶层的将是复杂且关键的器官，如心脏、肝脏和大脑；生命阶梯的顶层将是完整的生命单位—也许有一天将会是具备完整功能的人造生命形式。如今，3D打印技术已经实现所构想的阶梯的底层，我们正在探索中间级并梦想着有一天可以到达最高级。

3D打印生命阶梯

在特拉华州一所高中的毕业典礼演讲中，乔·拜登描述了一个美妙的未来：“通过使用3D打印机，我们将能够使受到外伤或烧伤的组织复原。这一目标指日可待。”拜登的说法虽有点儿大胆，但并非完全不靠谱。

让我们从位于阶梯底层—替换无生命的“身体部位”，如牙冠或假肢说起。第一波3D打印身体部位的商用浪潮已经出现，这些部位就位于行走中的普通人的身体中—可能也包括你。3D打印的骨植入物、牙冠、隐形眼镜与助听器等无生命修复形式已经存在于世界各地成千上万人的体内。

菲尔·里夫斯是致力于3D打印行业的咨询公司Econolyst的总经理。据他估计，目前“全球3D打印助听器的使用者大约有上千万”。隐藏在病人牙齿上以矫正牙齿的隐适美（3D打印的、可定制的、透明的一次性塑料矫正器）已经取得了巨大的商业成功。据估计，目前全球3D打印牙种植体的使用数量已经达到50万~75万个。

与3D打印的高端钛合金飞机部件一样，3D打印的人体部位也意味着小批量、数字化的定制生产。3D打印牙齿、助听器以及矫正器的过程都很相似：先对身体出现问题的部位进行扫描，再将扫描数据发送到一个特殊实验室，在那里这些数据被调整为可行性设计文件，最后，按照设计文件用软橡胶、坚硬而有光泽的陶瓷或者柔软而有弹性的透明塑料进行3D打印。

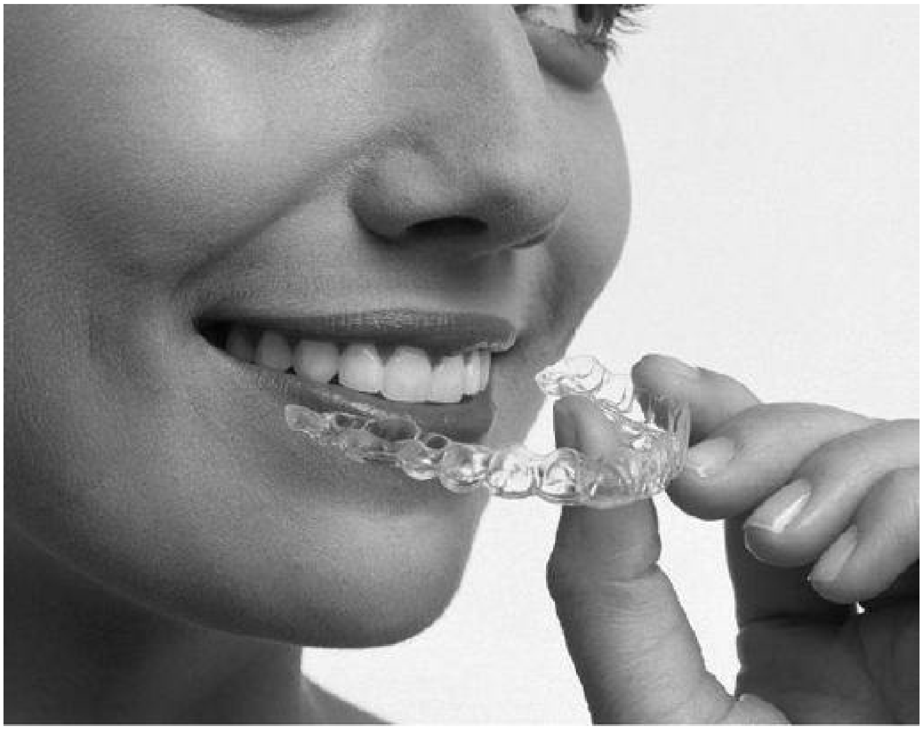


图7–2　每天3D打印约5万个定制隐适美矫正器

图片来源：Align Technology, Inc.

目前，3D打印身体部位采用单一的材料，如金属、陶瓷或塑料。它们具有商业意义，因为它们的市场价值来自它们能够与一个形状特殊的身体紧密贴合。它们可自定义形状、可小批量生产，对于制造商而言不存在规模经济（可获利），这些特征使它们成为3D打印的完美对象。这也使过去的监管障碍变得相对简单。与活性组织或药物不同，在身体中植入“螺栓组件”涉及更少的健康风险，其副作用也是可以预见的。

怎样的假肢富有吸引力？据美国一个倡导组织—截肢者联盟（Amputee Coalition）发布，目前美国约有200万人使用假肢。他们使用的假肢与从残酷的“二战”战场上退役的士兵们使用的假肢相比并没有很大改变。假手由金属制造，通过钳形的钩子可以抓住小型物品。

总部位于旧金山的小公司Bespoke Innovations（定制创新公司）设计并3D打印定制假肢，该公司最近被3D系统公司收购。该公司的创始人之一斯科特·萨米特说：“制造假肢的方法多年来并没有发生太大的改变：将一块泡沫粗略削成一个人腿的形状，然后做一个模具，把泡沫放入其中，去掉多余部分。”

假肢制造科学实现的大飞跃应归功于医学成像技术、设计软件以及新材料的改进，而3D打印为截肢者和医生带来了全新的高度定制化。Bespoke公司设计的3D打印假肢可以与使用者的身体和生活方式充分吻

合并迎合他们的审美。

Bespoke公司的制造过程首先是对患者“健康”的腿和他们目前的假肢进行扫描，对扫描数据建模形成设计文件，然后将“健康”的腿叠加到假腿的数字图像上，以确保新定制的肢体能够保持身体的对称。当客户选定属于自己的独特设计后，Bespoke公司将其3D打印出来。



图7–3　一个时尚的假肢

图片来源：3D Systems

Bespoke公司的在线工具（Configurator）允许客户对一系列设计风格进行选择，包括腿的图案、镀层材料以及罩面漆，通过生动的时尚赛车图案或别致的文身满足并体现使用者的喜好。该公司将其制造的假肢命名为“fairings”（美妙的罩），取义专业、时尚、高端的摩托车外罩。

Bespoke公司网站是这样介绍其产品的：“Bespoke　Fairings……不仅使已失去的外形得以修复，更是一种前所未有的个性表达。”使用Bespoke假肢的人的照片显示了他们心态的转变：过去总是隐藏他们的假肢，而现在Bespoke的客户则是自豪地穿着他们的假肢。

如果我们回到“3D打印生命阶梯”并上升一个梯级，我们将来到3D打印骨植入物。3D打印骨植入物与人造关节目前仍是探索性医学课题。截至目前，使用3D打印的定制钛合金人造关节的患者是幸运的（或者

可以说有足够的勇气），他们接受了先进的或者说试验性的医疗。

绝大部分标准的聚合物或钛合金骨替代物是注塑模具。那些限制塑料或金属机器部件制造的条件同样也限制骨骼制造。例如，不同的骨骼部位必须分别注模，然后再组装起来。刚成形的骨骼需要精确的冷却条件以保证它们不会收缩或变形并保持清洁。冷却过度可能使一块新聚合物骨骼变得易碎，而冷却不足将导致骨骼太软，使用时易受到污损。

3D打印的钛骨植入物已获得监管部门的批准，但打印的聚合物骨植入物还没有被批准。一旦打印的聚合物骨植入物获得监管部门的批准，它们将带来新的发展，因为聚合物具有钛和陶瓷所缺乏的特性。例如，3D打印的聚合物骨骼可以注入具有生物活性的促进骨生长的添加剂和活性药物成分，如抗生素或消炎药。一个3D打印的头骨可以以无可比拟的精度喷射这些具有生物活性的化学物质。

2012年有一则轰动全球的新闻，一支外科医疗团队完成了一个极具挑战性的手术：他们将3D打印的钛合金骨插入一位83岁患有口腔癌的比利时妇女的下巴。医疗团队首先对她的下巴进行了CT扫描。然后埃克兹洛克设计与移植公司（Xilloc）将CT扫描数据转换成可打印的设计文件，并通过计算机算法在下颌骨上增加了数千个不规则的凹槽和空洞。通过这种方式，她的血管、肌肉和神经可以更快地与新下颌骨结合，从而完全融入她的身体。

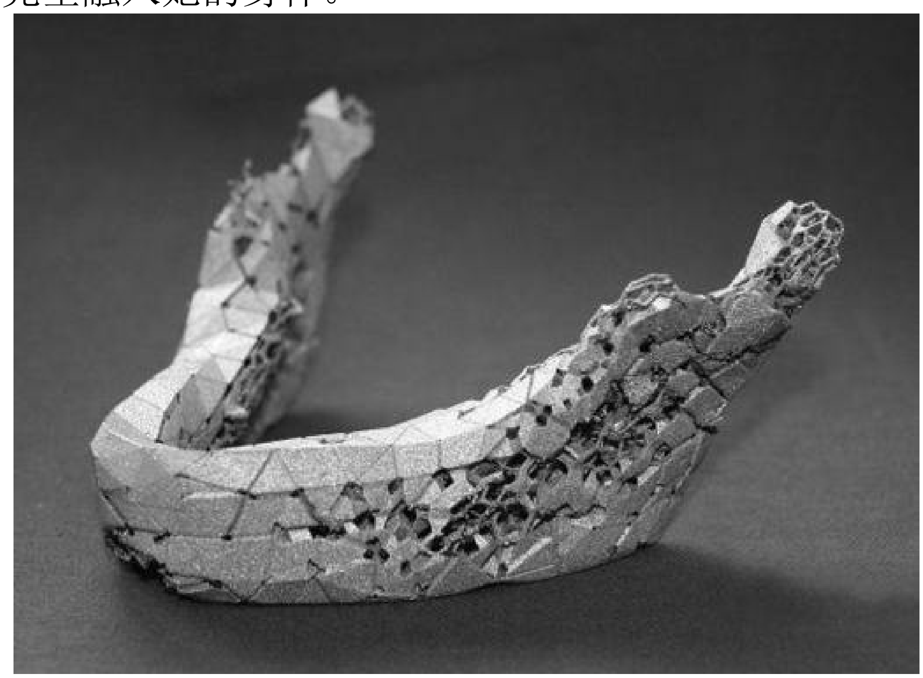


图7–4　一个新“出炉”的用金属粉末制造的下颌骨植入物

注：通过选择性激光熔融技术（金属骨泡沫）制造的具有仿生细胞结构的人类下颌骨。

图片来源：Fraunhofer IFAM

致力于高端医学3D打印技术的比利时莱尔怀兹公司（LayerWise）打印出这块钛下颌骨，方法是用激光照射钛粉，熔化3 000个精密排列的层，最后在打印的骨表面镀上陶瓷。手术几个小时以后，这位妇女就可以讲话甚至喝汤了。

组织工程学：3D打印干细胞

“bionic”（仿生）一词由希腊词“bios”（生命）和“electronic”（电子）中的“onic”组合而成，这个词的流行源自20世纪70年代一个非常受欢迎的电视节目，主角是史蒂夫·奥斯汀，即“仿生男人”（the Bionic Man）。而史蒂夫了不起的另一半“仿生女人”（the Bionic Woman）也成功地推出，并在《仿生男人》中不定期地客串。

由于在体内植入了一些非常昂贵的人造部件，“仿生男人”和“仿生女人”都有超人般的力量和激光般敏锐的头脑。在这些节目播出的国家，播出时段几乎所有的小孩都乖乖地守在电视机旁。我记得我和我的一帮朋友像慢镜头似地奔跑，一边做出夸张的身体动作或假装从敌人的防线下勇敢地逃跑，一边制造出电子配音。

几十年前，仿生部件听起来很有前途。但未来仿生身体部位的概念将听起来有点儿原始：它们容易出现故障、不能与身体充分融合，而且不能改进，这一点与目前人工置换髋关节和膝盖的限制类似。仿生部件未来将被定制设计的3D打印组织替代。

如果塑料是行业青睐的原始打印材料，那么干细胞将是生物打印的宠儿。再生医学越进步越倾向于回归自然。组织工程学的未来在于3D打印干细胞，经过精确配置让它们生成活性组织。

干细胞是人体的原始组成部分，在制造身体部位方面，它们比我们更擅长。干细胞具有非专属性，也就是说它们不会专门地生成身体某个部位的细胞。因此，干细胞可以分化为人体中已发现的约210种细胞类型中的一种。从医学角度讲，干细胞简直就是千足金。

20世纪80年代，研究人员从未出生的胎儿身体组织上发现并提取了第一个干细胞，引发了有关医学伦理的争论。此后，研究人员陆续发现了更多的干细胞，包括一些分散在成人身体上不同部位的干细胞。最近，研究人员发现一些已经分化的细胞甚至能够恢复到它们分化前的状态。

哥伦比亚大学杰里米教授3D打印出实验兔的新型臀骨并接种干细胞。首先，杰里米和他的团队分离出实验兔的臀骨并拍照，然后将图像转换为设计文件，3D打印出人造臀骨，然后将干细胞洒在人造臀骨上

并重新植入实验兔体内。4个月后，所有的实验兔都可以自如行走，有的甚至在术后几周就可以用臀部承载一定的重量。

杰里米和他的研究团队设计了带有细小而弯曲的微通道的置换骨，它可以促使干细胞爬到植入物的表面，从而帮助实验兔更快地愈合。在其他实验中，杰里米团队打印出实验鼠的置换门牙，撒上干细胞，并将置换物植入实验鼠的口中。9周后，由于门牙具有了理想的形状以及干细胞的注入，新的牙周韧带和骨骼接受了这一义齿。

无独有偶，与哥伦比亚大学杰里米教授的研究团队采用的方法类似，华盛顿州立大学的研究人员用磷酸钙、硅、锌粉制成了喷雾3D打印骨骼。细小的雾滴形成约20微米厚（人头发丝直径的一半）的薄层。研究人员在打印骨上喷上不成熟的人骨细胞。通过这种方法，不成熟的骨细胞在新环境中茁壮成长，并最终成为成熟的活性骨骼组织。

干细胞、生物墨与生物纸：3D打印活细胞

医学词典将组织定义为“共同实现某些特殊功能的相似特性化细胞的聚集”。我们的身体由不同类型的组织构成，从脂肪细胞组成的脂肪组织到缓冲我们关节的软骨细胞组成的软骨组织，再到完成复杂网络连接的神经元组成的神经组织。软组织通过内部支撑结构保持其形状。

当我们可以打印出活细胞并让它们成长为活性组织时，我们已经成功地到达了所假设的“3D打印生命阶梯”的最高级。真正的生物打印如我们所定义的创造活性组织，而非无生命的替换部位。生物打印涉及如何通过3D打印机将活细胞植入正确的位置，以制造具备一定功能的不同活性组织。

研究人员对于“生物打印”有着各种不同的定义，随着该领域的不断发展，“生物打印”一词可能承载更多的含义。对“生物打印”的一种理解是“活墨”的使用，即内部悬浮着活细胞的可打印凝胶。当活细胞被推压至打印头时，这种特殊的“水凝胶”会对活细胞起到保护作用。一旦“活墨”被打印出来并放到合适的地方，水凝胶将保持组织所需的结构。活细胞会分泌出一种物质进入水凝胶，从而最终形成一个支撑母体。随着活细胞的继续成长，母体会发展成软骨或其他类型的活性组织。

将活细胞放在正确的位置有点儿像将菜园中各类蔬菜种植在正确的位置从而得到最理想的光照。所有干细胞并不是完全相同的。到目前为止，在建造“完美的菜园”使干细胞位于最合适的位置方面，自然的力量还是远远大于人类或计算机的能力。

利用“活墨”3D打印软组织的主要优点之一是打印机可以将细胞喷射成精确的图案与形状。采用多个打印头的打印机可以更好地进行打印，

每个打印头可填充不同的细胞类型。因此，一个打印头可以打印一种类型的细胞，而另一个打印头可以打印不同材质的水凝胶。通过借鉴多材料3D打印概念并将其应用到生物世界，研究人员向构建能够模仿自然的复杂形状、内部结构以及细胞多样性的人造组织这一目标又迈进了一大步。

将细胞放在正确的位置是一个挑战，另一个挑战是确保细胞的放置可以使其最终形成正确的形状。细胞的位置和生成组织的形状是器官实现功能的关键。生长因素也要打印并加以考虑。

例如，心脏组织要求高细胞密度以确保心脏有规律地跳动。如果植入人造心脏组织支架上的细胞不是紧密相连，将造成不规则的心跳。由于组织的设计是基于计算机的控制，利用“活墨”生物打印的组织将是精确的，并且可以重复设计。

最后，另一个人类尚未解决的问题是活细胞需要一个“启动”按钮。目前，尽管研究人员可以将细胞以完美的形状放在支架上的正确位置，但是仍然没有人准确地知道如何启动种子细胞。自然知道如何让一个器官开始运作，但我们仍不知道。

美国密苏里大学和耶鲁大学组成的一个研究团队创造了词汇“bioink particles”（生物墨粒子：多细胞球体）和“biopaper”（生物纸：生物兼容凝胶）。在《自然》杂志的一篇文章中，美国密苏里大学的研究人员加博尔·弗加斯（Gabor Forgacs）教授介绍了他的方法：“将你的细胞交给我们，我们培育它们、打印它们，结构一旦形成，我们就准备好了。”

他的团队使用的是一台定制的3D打印机，最初是用来制造微电子：

> 打印机有三个打印头，每个打印头都由连接的计算机控制，像普通打印机可以放入墨一样，这台打印机可以放入细胞球体。
>
> 两个打印头打印出组织细胞（包括心脏和血管内皮细胞等的混合物），而第三个打印头打印“间隙填充物”（如胶原蛋白）以暂时填充空间直到与其他细胞融合。因此，为了制造血管，细胞被铺开，其中加入胶原蛋白，而之后胶原蛋白将被提取出来为血液让路。

要理解为什么生物打印具有如此大的潜力，我们可以简单地把它与组织工程学的现有方法进行比较。

数十年来，人们一直通过一个“两步法”制造活性组织。第一步是使用某种生物可降解材料设计组织的支架。为了使用传统方法制造设计的支架，研究人员需要为它建模、雕刻出来，或使用化学品蚀刻出一个多孔的形状。第二步是利用活细胞培育出这个支架。

与这种方法相比，3D打印可精确地打印出活细胞的形状，让其形成

自己的母体，并最终成为支架。传统的组织工程技术已经帮助无数患者获得了失去的软组织，然而，其中存在许多局限性。

正如研究人员米格尔·卡斯蒂略、伊纳·皮雷斯、芭芭拉·戈维亚和若热·罗德里格斯所描述的：

> 这些技术存在许多弊端，比如大量使用高毒性有机溶剂，制造周期长，劳动密集型流程，无法完全去除聚合物基体里的残留颗粒，重复性差，毛孔呈现不规则形状，毛孔间无法充分连接，结构偏薄等等。此外，这些方法多数无法控制形状。

换句话说，手动创建的人造支架可以生物降解并以无序的方式分散细胞和颗粒。此外，基于预先形成的接种活细胞的支架上的组织可能不会与患者现有的活性组织完全融合。由于人体组织有许多特殊而精密的形状，因此很难制造出具有精确轮廓的组织支架。最重要的问题是，在现有的支架里培育多种细胞类型是非常困难的。

打印活性软骨

软骨是展示自然神奇的组织工程能力的一个典范。人体内的软骨能够多年保持其形状不变，或对我们的关节提供缓冲，以承受数年的冲击。关节软骨作为保护层可以防止骨骼间的相互摩擦，从而对膝关节起到保护作用。软骨也使我们的耳朵与鼻子可以弯曲，并在扭曲时保持弹性。

与骨骼一样，软骨组织也是由几种细胞类型组成的简单组织，不包含静脉，而且用途相对简单。软骨不需要消化食物，不需要听从神经细胞的指令，也不需要快速响应环境影响。但是，制造像软骨这样相对简单的组织也不是目前医学上能轻而易举完成的事情。

软骨是一个基本组织，但不幸的是，至今我们还没有可行的方法制造人工替换软骨。如果你打了多年壁球或者是一名专业长跑运动员，你会知道，一旦你的关节软骨磨薄了，这就意味着磨去的部分没有了，不会再变回原来的厚度。关节之间缺少软骨将是毁灭性的，这将使数百万人遭受膝、肘、髋关节以及手指的疼痛和骨关节炎。

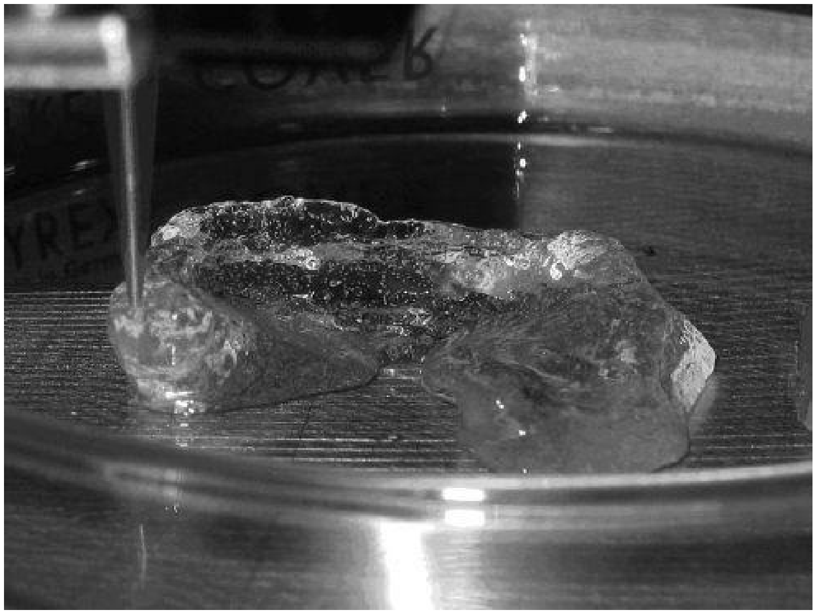


图7–5

注：我们3D打印出源自一只羊的活细胞的人造半月板，其“设计文件”是一个CT扫描。打印的细胞在新的环境中生长，半月板尚未被植入。

图片来源：Daniel Cohen and Larry Bonassar

3D打印有望制造人造软骨。在康奈尔大学，我与丹尼尔·科恩、拉里·博纳萨3D打印了羊的半月板。首先，我们对羊的膝关节进行了核磁共振成像扫描并将图像数据形成一个设计文件。其次，我们从羊身上提取了活细胞，并搅拌进医疗性水凝胶。最后，我们通过一个3D打印机打印头（相当于一个注射器）对凝胶混合物进行挤压。在后来的研究项目中，拉里3D打印出真正的人耳软骨，它的设计文件来自对外耳的光学扫描数据。

人体是复杂的，就连制造一个像软骨这么简单的组织也是一个复杂的过程。虽然可以3D打印出活性软骨，但这也只成功了一半。我们还没有解决第二个更关键的挑战，我们的关节是用来做苦力的。在人造软骨被移植到体内之前，需要增强其韧性和适应性。因此，软骨在被植入前必须在研究实验室内进行机械应力的实验。

就像一个被宠爱的孩子一样，人造软骨在有盖培养皿中享受着特权生活而无须面对现实生活的无情冲击。在没有外部压力的情况下，比如游泳或打网球，人造软骨会保持松弛和脆弱。如果人造软骨在未加固前植入膝盖，很快就会被压扁到不成形。当我和丹尼尔、拉里向一些专业的外科医生展示我们的第一批3D打印羊软骨时，他们很快就否定了它们，因为他们发现打印的软骨太脆弱了，甚至不能承受简单的缝合。

研究人员正在寻找这个问题的解决方案，一个可行的方法是将人造

组织放在一个生物反应器中以模仿真正的组织成熟方式。为了使生物打印软骨能够投入实际应用，也许可以通过水凝胶材料的进步解决这个问题。另一种可能的解决办法是在生物打印软骨的初期，创造性地运用其他压力来源（比如光、热或声音振动）。的确，软骨也需要“严格的磨合”。

打印心脏瓣膜

软骨可能是一个相对简单的活性组织，但有些类型的软骨却更加复杂与关键。例如，如果你的膝盖或肘部的软骨受损，你可以继续生活（虽然会有阵痛），但是如果你心脏瓣膜中的软骨不工作了，那么你死于心血管疾病的风险将增加50%。

没有器官比心脏更重要。心脏是由肌肉、血管和软骨组成的，它们在射向整个身体的电脉冲所精心设计的复杂程序里共同协作。一个人每天平均心脏跳动近10万次。事实上，心脏每年要承受自身的冲击约8 000万次，平均一生约50亿~60亿次。

医学上最棘手的心脏部位之一是薄薄的纤维瓣膜。人的心脏被瓣膜分成四个心腔。心脏瓣膜就是在血液从一个心腔流向另一个心腔时，为控制血流方向而精确地进行开关闭合的单向通道。如果这些瓣膜不能正常工作，患者的心脏最终将走向衰竭。据美国心脏协会报告，每年有500万美国人被诊断出患有心脏瓣膜疾病，而心脏瓣膜缺陷是一种常见的先天性疾病。

心脏瓣膜非常小，新生儿的心脏瓣膜有10美分硬币大小，成人的也只有25美分硬币大小。血液必须按照一个方向进行脉冲。如果心脏瓣膜出现机械性不足，它就会开始慢慢泄漏，有点儿像一个企业中由于一名不称职员工的偷工减料，最终导致几个重要职能部门慢慢瓦解。如果瓣膜增厚或变得僵硬也可能导致心脏衰竭。

也许有一天3D打印的心脏瓣膜可以解决这一切。美国康奈尔大学的乔纳森·布彻教授是生物工程人造心脏瓣膜领域的主要研究人员之一。我去康奈尔大学生物工程学院拜访了乔纳森，这个学院位于一个崭新的白色大理石建筑中，冰冷的石头地面放大了脚步的回声。整个气氛太肃静了。接待区超大的四方中厅会让到访者感到空旷，而显得人类是那么渺小。

乔纳森的办公室与刻板、空旷的环境形成了一定反差。两幅多彩的油画为办公室增添了温暖，这是乔纳森班上一名本科生送给他的礼物。乔纳森告诉我：“这名学生画的是从不同阶段的鸡胚胎中分离出来的心脏。”我请他解释一下现在人造心脏瓣膜面临的挑战。他说：“目前外科

医生更换心脏瓣膜有两种方法，其中一种是机械心脏瓣膜或者牛或猪的瓣膜，把它们像一张软皮一样清洗干净。”

目前可获得的心脏瓣膜无论是机械的还是动物的都存在严重缺陷。一个机械心脏瓣膜的好处是它被植入后能维持很长一段时间。然而，一个机械心脏瓣膜可能产生血块，脱落后可能进入大脑。这就是为什么使用机械心脏瓣膜的人必须服用稀释血液的药物，这就引发了另一方面的医学挑战，以及对职业与生活方式的限制。

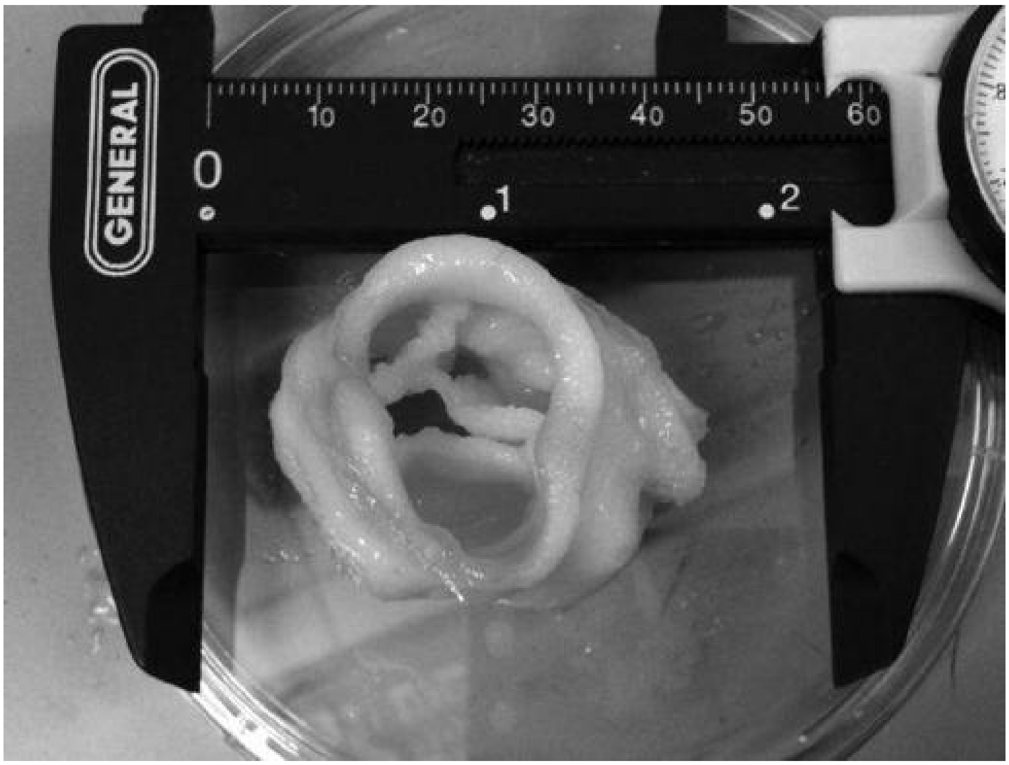


图7–6　3D打印人造心脏瓣膜

图片来源：Jonthan Butcher, Cornell University

来自动物（通常是猪）的心脏瓣膜不需要血液稀释剂，但无法维持很长时间。移植的动物瓣膜不足以支撑年轻患者的长期身体活动。此外，无论是机械的还是生物衍生的人工心脏瓣膜都不能与它们的机体共同生长，这就意味着使用者必须重复进行心脏手术以植入越来越大的瓣膜。

乔纳森解释说，未来某一天外科医生将用一种全新的方法挽救患者的生命：为患有先天性缺陷的孩子直接植入一个3D打印的全新的心脏瓣膜。乔纳森认为，这个解决方案的关键部分是破解胚胎中的干细胞是如何发育成成熟的心脏瓣膜细胞的。乔纳森相信，如果他能深入了解这个成熟过程，他将向未来生物打印功能健全的人造心脏瓣膜迈进一大步。

乔纳森的研究目的是破解生物打印的三大难题。首先，他要解决老生常谈的“严格的磨合”的问题。与关节软骨一样，打印的心脏瓣膜必须放在生物反应器中“稍稍捶打”才能够正常工作。

乔纳森正在尝试以单一的“打印任务”完善多种不同类型干细胞的生物打印的方法。为模仿大自然将许多不同类型的细胞组成精确而具有一定功能的形式，乔纳森一次使用多个打印头进行“活墨”3D打印。为了一次生物打印不同类型的干细胞，乔纳森改装了一台具有多个打印头的Fab@Home生物打印机。

最后，因为生物打印的定义是多材料打印，乔纳森正在开发一种软件，可以设置多个打印头的运作，而每个打印头中包含不同的细胞类型。他说：“一台3D打印机可以按照设计文件的指示打印一种类型的材料。所以我们必须发明一种软件算法，使一个设计文件管理多打印头的3D打印机，从而使我们能够一次打印多个不同类型的细胞。”

乔纳森的主要关注点是为准备生物打印的干细胞定义最佳的形状。由于心脏瓣膜上的细胞必须紧密排列在特定位置才能工作，因此细胞定位是至关重要的。干细胞就像勤奋、自主的员工一样，它们只是需要恰当的工作环境。“把一个干细胞想象成一只工蜂。”乔纳森解释，“如果你能够找到一种方式将某种类型的干细胞准确地打印在组织的正确位置上，就好像让一个干细胞走进一间空的办公室，然后开始自己寻找需要做的工作。”

随着乔纳森等研究人员不断破解3D打印活性组织的奥秘，我们希望器官移植的风险在未来完全消失。3D打印来自患者自身的干细胞的美好之处在于患者的免疫系统会更容易接受打印的替换器官。与人工心脏瓣膜使用者服用的血液稀释剂一样，使人衰弱的免疫抑制药会引发一系列副作用，而由一个孩子自身干细胞打印的心脏瓣膜植入物将能够与身体共同生长并自我修复。

我们能设计、打印自己的身体吗

不管设计人员的技术如何娴熟，都不可能启动计算机运行“身体的CAD”软件程序。虽然一些新兴软件类型在向这方面发展，但对于一个身高1.78米、体重130斤且右内侧韧带反复受伤的女跆拳道黑带选手来说，为她设计一个新膝盖是不可能的。

商用设计软件的起源是工程学（产品设计）或计算机绘图（动画或电子游戏）。设计软件工具存在局限的一个原因是在此之前没有人曾想到我们会需要计算机辅助设计身体。如果你想这样做，制造新的身体部件可能与制造新机器部件或创作一部新动画电影具有一样的设计流程。

为了对“身体的CAD”概念有一个更深入的了解，我来到了西部虽然偏远但环境优美的世界一流科研型大学—犹他大学。几十年来，犹他大学一直是数字成像技术创新的摇篮。犹他大学校友名单上的名字几乎全部与计算机图形有关：奥多比系统公司创始人之一约翰·沃诺克、皮克斯动画工作室创始人艾德·卡特莫尔、硅谷图形公司及后来的网景公司创始人吉姆·克拉克，另一位校友诺兰·布什内尔在雅达利公司工作期间创作了第一个成功商业化的电子游戏《攻破对方大门》（*Pong*）。

位于盐湖城的犹他大学依偎在群山的怀抱中，这里夏季是郁郁葱葱的绿色植被，冬季则是白雪皑皑。对于习惯了美国东海岸不那么四季分明的人而言，盐湖城就像月面景色。像一个价值数百万美元的月球表面研究站，犹他大学成立于1994年的举世闻名的SCI研究所（科学计算与成像研究所）就坐落在校园的一角，透过窗户可以远眺层叠的山峰。

犹他大学SCI研究所的研究目标是融合医学成像、可视化、科学计算和大数据研究等领域。犹他大学给人的一种感觉是万事皆有可能。犹他州人烟稀少，但拥有几个国家公园和穿越原野的风景秀丽的公路，是滑雪者和徒步旅行者的天堂。

在窗台上摆放着兰花的安静的办公室中，我拜访了SCI研究院的创始人克里斯·约翰逊。克里斯非常冷静，从容不迫，他温文尔雅的举止背后是这样一个事实：过去这些年，他在生物医学计算和成像领域的工作为他赢得了一系列奖项，其中包括最近赢得的“美国电气和电子工程师协会查尔斯·巴贝奇奖”—相当于计算领域的“奥斯卡终身成就奖”。对于我的突然到访，他依然彬彬有礼，并专门带我参观了SCI研究院崭新的四层大楼。

我问了克里斯一个关键的问题：将来是否会用商用设计软件设计和改进人的身体部位？他的回答是“可能会”。

克里斯解释说：“现在从几何的角度来看身体过于复杂，而CAD模型则是基于常规的几何形状。”也就是说，我们的身体非常复杂，是由各种材料和复杂形状的组织、骨骼和血管组成的。目前依靠现有的软件和硬件还不可能捕捉足够的细节3D打印真正的活性组织。

克里斯看到了他所说的医疗成像、大数据、电子游戏动画和传统的计算机辅助设计软件的“大融合”。SCI研究所的科学家们在探索如何以数字形式捕捉和模拟人体，以及开发未来在3D打印活性组织中发挥至关重要作用的软件。其他研究人员正在开发计算机算法，从而巧妙地将扫描的问题器官的横截面与单一的3D计算机模型联系在一起。他们面临的主要挑战仍然是如何最有效地管理医学成像过程中产生的大量数据。

在更大范围的计算机行业里，商业视频游戏设计者们在捕捉表面细节方面取得了重大突破，并能够更好地理解如何以图形方式描绘我们身体的移动。医疗机构在捕捉人体内更精确的数字细节方面取得了巨大进步。学术界的科学家们也正在建立前所未有的更强大算法，模仿、预测和分析来自于生物系统的数据。

真正的生物打印（设计并修改活性组织和身体部件）将无法实现，除非实现真正可用的身体CAD。医学成像再强大也只能生成身体已有部位的设计文件，没有软件可以让医学专家设计出一个全新的心脏或者修改一个已有的心脏。

人体的最大问题是它的不规则形状。我们的身体是几何复杂性的奇迹。我们每个人都有自己独特的身体形状，有着许许多多的表面曲线、不同的细胞类型以及无数的微小细节。更进一步看，人体的皮肤下面存在着像神秘的银河一样复杂的生物世界。

身体是不断变化的。随着我们的环境、情绪以及食物的不断变化，它们也会喜怒无常、不断变化。无数细胞每天以我们尚不能充分理解的神秘方式生长、愈合和变化，我们还没有解码细胞彼此间如何传递信号。

传统的设计软件、医学成像和数据分析的进步为3D打印生物替换部件铺平了道路，但是我们会很快看到身体部位商用设计软件吗？目前还不可能。然而我们每年都在向前推进。“我看到了世界上的模拟软件、医学成像、计算机辅助设计系统正在融合。”克里斯开玩笑说，“它将为我们定制药物，这好极了，尤其是如果你将来需要额外的身体部件。”

在工业产品设计中，设计师们逐渐了解到随着设计工具的不断改进，自然成为越来越有用的灵感来源。身体设计也是如此，生物是数百万年残忍、迭代设计周期的产物。作家与设计预言家珍妮·班亚斯说：“我们一次又一次发现仿生学非常有效，因为它为我们提供了物种转变战略，使我们能够通过模仿地球上38亿年来的设计和策略适应这个星球并在这个星球上繁衍生息。”

打印人造身体部位

如果没有针对身体部位的设计软件，当今人们怎么能够打印牙齿和骨骼替代物呢？进行钛下颌置换手术的外科医生怎么能够3D打印出置换下颌的精确形状呢？答案很简单。他们CT扫描患者身体，将捕捉的图像数据形成一个文件，然后将图像文件转换为可以进行3D打印的文件格式。

由于计算能力大幅增强以及新图形算法的出现，医学成像技术让我

们能够比以往任何时候更密切地关注身体内部。医学扫描透过表面，可以看到器官内部并描述其软、硬组织，气室、磨损和堵塞情况。作为历史最悠久、使用最广泛的医学成像技术，X射线通过电磁波能够透视身体。

超声波是另一种广泛使用的成像技术。超声波像蝙蝠在黑暗中导航一样，通过搜寻从器官反弹回来的声波判断它的形状与表面细节。另一种广泛采用的成像技术是医用核磁共振成像（MRI），其原理是磁化人体内水分子的质子，并将其产生的振动转换成器官和软组织的高清晰度图像。还有一种成像技术称为正电子发射断层造影术（PET），其原理是检测患者吞下或注入患者体内放射性物质的γ射线，并通过γ射线摄像仪对其进行捕捉。

如果你看过有关医学犯罪的电影，或看过自己的MRI或CT扫描图像，你可能会注意到医学图像并不是一张图片，而是由几十个图像组成，它们分别描绘了身体某个部位的一个横截面。核磁共振和CT扫描等医学图像会用上百个灰色阴影描绘身体：骨骼显示为白色，软组织类似于阴天时天空中细微的颜色变化，空隙（如肺部内侧）则显示为纯黑色。

在医学成像中，不同类型的细胞有相似的物理密度，在图像中会出现相似的灰色阴影。这些混乱的灰色阴影是将图像数据转换成可3D打印的文件格式的一大障碍。不管怎样，医学图像中的细微阴影必须被解码，才能在计算机设计文件中建模。

白—灰—黑的渐变并不能为3D打印提供足够的信息，因为复杂的身体结构涉及多种细胞类型，而它们的外观相似，容易混淆。计算机越来越能够区分细微图案，即使是最细微的图像变化，所以还是大有希望的。将灰度图像转换为清晰而有意义的数字数据仍是医学成像研究的主要领域。然而，尽管存在这些限制，医学研究人员和外科医生还是成功地3D打印出各种准确而精密的人造身体部位和外科手术模型。

生物打印的未来

很多人由于患有疾病、先天性缺陷或意外受伤而需要替换新的身体部位，50岁以上的人可能有一半使用了替代的椎间盘。尽管需求量很大，但可替换的身体部位很难找到，而且费用高昂。根据美国器官资源共享网络（UNOS）的数据，只有1%~2%的人死前会成为潜在器官捐献者。即使是世界上最富有的人之一史蒂夫·乔布斯也不得不等待他的胰脏捐献者，然而不久便辞世了。

如果干细胞是生物打印的原材料，3D打印复杂的血管系统仍然是组

织工程学需要攻克的难关，相当于“四分钟跑一英里”的极限。2004年，南卡罗来纳医科大学研究人员写道：“血管化3D软器官的组装仍是一项巨大的挑战。”几年后，情况依然如此。

《科学》杂志上的一篇文章充分证明了这一点：

> 如果没有血管系统—提供养分并带走废物的高速路，3D器官结构中的活细胞将迅速死亡。通过几层细胞成长起来的薄组织没有这个问题，因为所有细胞能直接获得养分和氧气。因此，生物工程师们在探索如何3D打印含有大量活细胞的原型组织。

尽管有可能3D打印活性静脉，但是仍然不能完成整个工作。与人造软骨需要经过生物反应器的冲击后才能从培养皿中取出放入成熟的组织中一样，高度血管化的身体部位即使可以打印，也不能直接植入人体，而是需要它直接在体内生长。新的动脉和静脉需要与身体现有的动脉和静脉融合在一起。

威克弗里斯特大学再生医学研究所詹姆斯·刘教授描述了这一挑战：“我们怎样才能连接在体外制造的组织呢？不管将什么放入体内都必须与人体的血管、血液供应和氧气相连，这是我们在处理较大器官方面面临的挑战之一。”

致力于未来生物技术的研究人员已开始着手研究这一方面的解决方案。与其他医疗人员一样，斯坦福大学博士后亚瑟·善雅尼（Yaser Shanjani）也认为3D打印和设计软件是医学研究的重要工具。他说：“我相信，未来的工程组织学将与3D打印实现令人难以置信的融合。”亚瑟专攻打印骨移植物，用专业术语表达就是“3D打印生物吸收性无机高分子材料”，并将其最终植入患者体内。

亚瑟认为，全面融合了3D打印技术、设计软件与人体自身生长因子的方法是最具前景的方法。在他整个研究生研究阶段，亚瑟曾与由生物学家、外科医生以及材料与制造专家所组成的跨学科团队合作。他解释道：“一个理想的骨植入物是经过精心设计的骨结构，它模仿了自然组织的几何结构、微结构与力学特性，并将最终取代自然组织。”

我问亚瑟，如果有人给他几百万美元推动生物打印的发展，他将怎样利用这笔资金？他立刻斩钉截铁地回答：“我会用一部分资金学习打印由生物制剂（如干细胞和生长因子）培养成的植入材料制成的器官。接下来，我希望在操作室中添置这种真实的打印机。然后，最终理想是将微型机器人放置于患者体内，并在其体内打印新的器官。”

在人体内直接打印活性组织和新器官将是医学界的一个根本性突破。在人体内进行打印的方式可显著提高战场上受伤士兵以及急诊室里事故受害者的生存概率。在不是十分紧急的情况下，打印精确形状活性

组织的能力将开启崭新的医疗和外科培训领域，并将促进药物开发新方法的诞生。

定制打印人造组织或小型器官将成为非常有用的研究性临床测试。人造组织可用于疾病研究，或将干细胞培养成为成熟的、分化的细胞。与使用小白鼠或培养皿（都是粗略地近似人体）进行新药测试相比，如果使用患者的细胞3D打印出人造的小型器官，那么我们将能够更准确地判定某一种药物的效果以及它所产生的副作用。

3D打印人造小型器官可以帮助培训年轻的外科医生。尸体长期以来一直是这种培训的载体，但这也存在一些问题，大多数教学医院为学生提供的尸体是随机分配的。换句话说，对于为了科学而同意捐献遗体的人，他们的死因往往与教学课程或特定的研究项目并不匹配，这着实是一件令人沮丧的事情。

随机选取尸体对于入门级教学课程来说还能应付，然而对于要深入钻研具体专业的高年级学生（和医学研究人员）来说，这种“一刀切”的方法则限制了他们的选择。例如，如果一所医学院希望培训学生怎样进行脑肿瘤手术，它将面临一个难题，甚至可以说是一项不可能完成的任务，就是如何在法律许可的情况下获得一些刚刚死亡的脑肿瘤患者的尸体。

在我们能够3D打印精确的身体状况之前，医学院只能继续寻找其他方式。即使在具备条件的医院里，接受训练的外科医生也只能进行一些技术含量低的操作。我在参观一所大型教学医院时，一名教学人员向我展示了他们如何训练学生做心脏搭桥手术。教学人员将一件衬衫撕下两片塞进一个封闭的盒子中，要求学生通过盒子一侧的小孔使用手术工具将它们缝合在一起。

3D打印机可以按照需求制作特殊的外科手术教学模型。打印的教学模型可以精心设计，模仿身体组织、器官甚至完整部位的特点。在真正的生物打印成熟之前，医学院可以通过这种方式打印出“仿制”部位，不仅模拟了实物的外观和感觉，并且满足主要特征和病理需求。

目前医疗已经使用了3D打印的骨骼或器官手术模型。在手术计划或手术建模中，即手术前的“带妆彩排”，外科医生会使用与他们将要进行手术的骨骼或器官同尺寸的真实的“练习部位”。为了减少手术的时间和避免潜在的风险，外科医生会练习组装、推进甚至将这些“练习部位”组合在一起。手术模型还可以帮助外科医生向患者家属解释手术程序。



图7–7　用于医学教学的基于CT扫描的打印模型

图片来源：Objet Inc.



图7–8　兽医使用3D打印的狗骨骼手术模型练习即将为狗进行的髋部手术

3D打印的手术模型和无生命假肢仅仅是个开始，生物打印将会把个性化医疗推向新的高度。在此期间，医学研究人员和技术人员会面临技术、生物、社会以及监管等方面的一系列障碍。

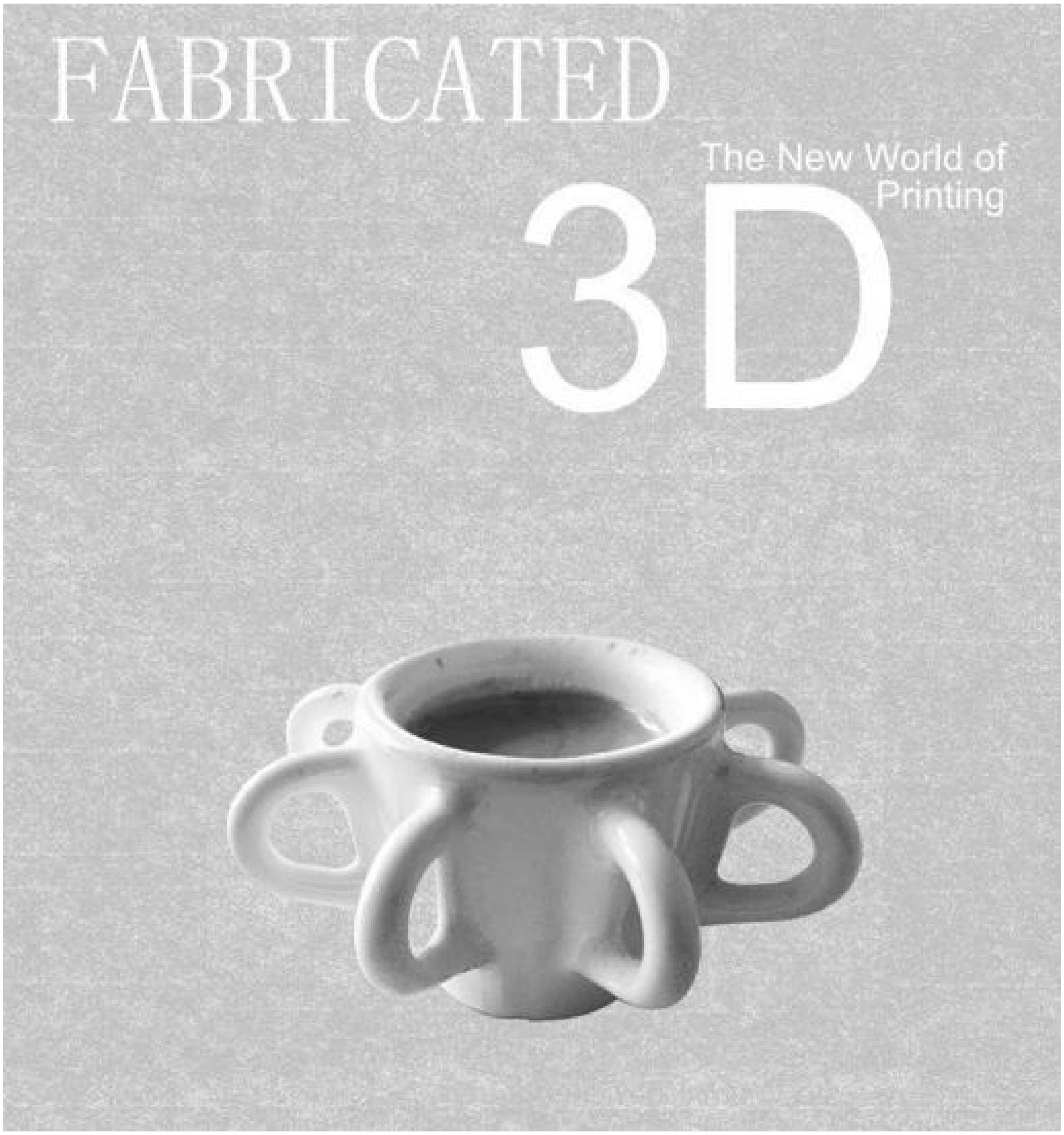
我们的身体是由成千上万种不同类型的材料组成的，目前的3D打印机一次只能打印出几种材料。复杂的器官中布满了血管。许多重要的器官，比如心脏，不允许任何技术差错或调整。没有人完全知道如何唤醒人造身体部位的生命。即使是简单的身体器官，其功能的实现也需要无数不同类型细胞准确而协调的相互作用。

人造组织仍然是一项脆弱且艰难的活动，因为它涉及道德问题、政治争议以及需要严格的监管程序（确实如此）。获得政府监管部门对一项新医疗技术的批准可能需要数年、数百万美元的研究。使外科医生和医疗保险公司接受生物打印是一个标准的医疗业务过程，也将需要多年

的努力。

医学和3D打印技术的快速发展将改变医学界。现代医学对于生活在100年前的人们来说是非常不可思议的，或许100年后，生物打印将成为一种普遍的医疗方式，就像“青春之泉”一样神奇。

第8章　3D打印时代的数字厨房



未来家庭厨房里的私人厨师将会是一台3D打印机。此打印机与网络相连，等待接收电子邮件或短信指令，为你做一顿美食。

谈到3D打印食物，公众的反应通常是惊奇并掺杂些许抵触情绪。食材由3D打印机烹饪成特定形状，对这一过程，公众感觉有点儿怪异。这当然有趣，但更多的还是异想天开。

食品打印技术还是成功地刺激了人们的猎奇心理。在华盛顿一家酒店外，我正艰难地将笨重的Fab@Home打印机挪向出租车站，目睹这一过程的出租车站管理员向我走来，但他并非如我所愿帮我叫车，而是想

一探3D打印机的究竟。

“我在电视上见过这个！”他兴奋地指着打印机大声说道，“你就是那个做食品打印的家伙吗？”我十分确定地告诉他“是的”，我们就是他在电视节目中看到的人和打印机。之后他开始对打印机细致打量，甚至帮我叫来出租车后还兴致勃勃地继续说：“那期节目是我和妻子一起看的，节目播出后，她就想着拥有一台3D打印机，并且已经在设想愤怒小鸟饼干的打印方案。我姐夫也非常想给自己打印些西兰花……”

之后几天，我参加了主题为“酒店业的未来”的酒店高管会议，并发表了关于食品打印机的演讲。一整天里，高管们都在听演讲。他们礼貌地坐着，偶尔记记笔记。十分难耐时，演讲者和与会者去休息间，吃点儿美食或给咖啡续杯放松一下。最终，听够吃好后，我的演讲—食品打印机登场了。

我将Fab@Home打印机放到桌子上，加入饼干面团，开始演示打印任务。几分钟后，台下听众开始伸长脖子看。接着，人们都站了起来。之后人群开始向演讲台移动，我有点儿疑惑，也有点儿担心，因而不得不中止了演讲。

我的听众分散开来，凑成团，包围了食品打印机。这些酒店业高管们都暂时忘记了自己的身份，好奇地围绕在打印机周围，研究打印机的打印头是如何前后运动，又是如何将饼干面团打印成各种形状的。由于大家都围绕在打印机周围不肯离去，我不得不直接跳入讨论环节。

大家回到座位开始头脑风暴。一名销售主管说，他的团队应该为顾客度身定制并在酒店前台提供新鲜的3D打印食物。另一名主管则表示，她的酒店将在客房服务套餐中为顾客提供主题为3D点心的小吃，或者根据顾客独特的膳食需求，为顾客量身定制点心。

这些宣传经历告诉我，不论身份地位，大家都对食物制作很感兴趣。但3D食品打印技术尚处于萌芽阶段，只有少数冒险家和学术机构在进行实验。但是，就像微波炉和自动咖啡机一样，食品打印机市场前景广阔。

数字烹饪：一场烹饪革命

商用3D食品打印机目前还没有面向市场，但如果时间快进几年，我们将很可能在家用电器市场发现琳琅满目的食品打印机，如“科纳科皮亚”，或“自动聚宝盆”—专为家庭设计的四款食品打印机，它们分别是数字巧克力机、数字加工器、机器人厨师和专业搅拌器。

以“科纳科皮亚”为例，马塞洛·科埃略和杰米·英根伯领导的团队创造了“科纳科皮亚”概念。通过在其官方网站上传未来原型的超炫图

片，“科纳科皮亚”概念得以推出。食品打印机“科纳科皮亚”系列自上线以来，由于形象逼真，立刻在网络上受到了广泛关注。公众很难确定这些设计概念图片是不是真的食品打印机，或者只是巧妙地呈现出了设计概念。最终，这一疑惑得到了解答，食品爱好者们了解到“科纳科皮亚”原型还不能转化为商品（3D打印狂热者和愿意采用新技术制作美食的美食家们更多的是失望）。

“科纳科皮亚”设计概念旨在引领烹饪界变革。其官网指出：“数字媒体技术曾推动社会各领域的发展变革。但烹饪界的改革仅仅局限于对上百年来一直使用的陈旧烹饪工具的细微改动。”因此每款“科纳科皮亚”概念打印机都将带来一种烹饪方式的变革。但让设计团队感到棘手的是，数字媒体技术在烹饪界的普及度相对不足。科埃略和英根伯同时在网站上提到：概念打印机可以提供一种新的烹饪方式，通过改变烹饪的方式，在原始食材中加入添加剂，最终将食物加工成美观的纹理和形状，但又保持美味。

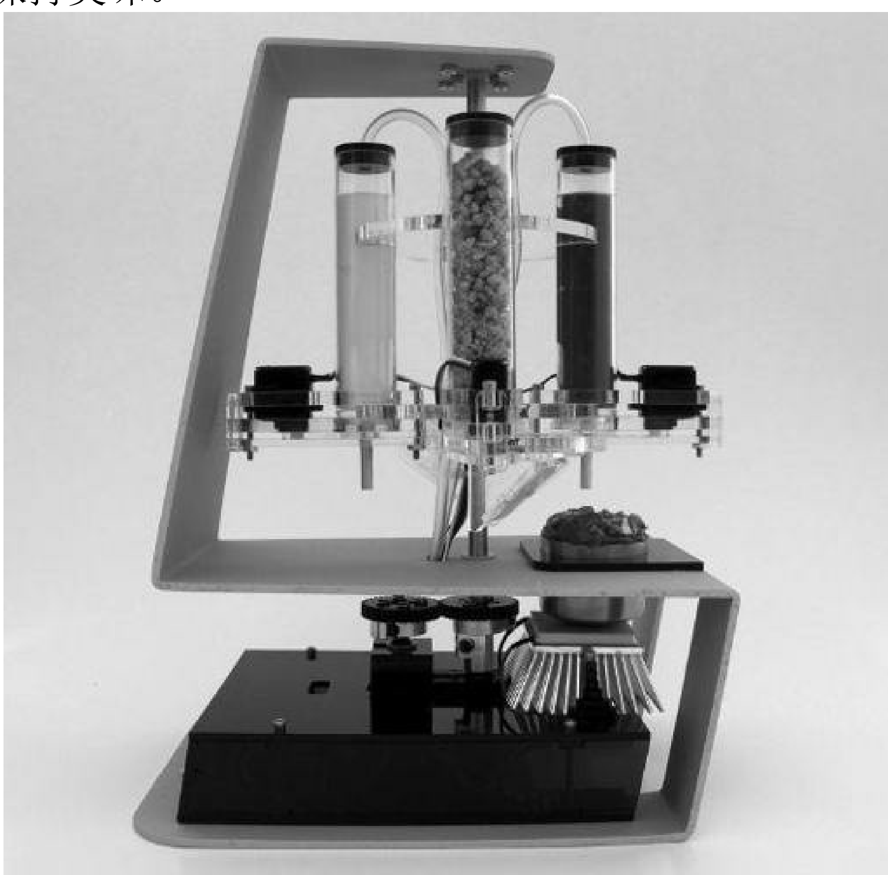


图8–1　数字巧克力机是一款食品打印机，可为顾客制作巧克力

图片来源：Marcelo Coelho

公众对“科纳科皮亚”食品打印机原型抱有强烈的感性诉求和审美情

趣，证明烹饪和饮食领域具有无限的改革潜力。食品打印机也将提供新的创意机会。传统烹饪器械，如切割刀具和烘烤模具，因精准度低，不能加工出复杂多变的形状。但依据科埃略和英根伯的说法，数字烹饪技术却可以烹饪出传统烹饪技术无法企及的口味和形状。

如果食品打印机成功问世，每一台食品打印机都需配备触摸屏、内置记忆卡和网络连接设备，方便使用者记录和上传食材配方、食材质量、营养含量和食材口味等数据。备受公众关注的数字巧克力机原型可以让用户体验更快捷的巧克力设计与制作过程，品尝到各种口味的巧克力糖果。根据设计，只需将食材加入巧克力机传送带上的食盒即可。站在消费者的角度，我还希望该打印机可以装配一键上传功能，方便我更快捷地与亲朋好友分享巧克力点心的创作心得。

第二款“科纳科皮亚”设计概念的原型是家用“数字加工器”，一款个人的3D食品打印机。“科纳科皮亚”官网将其描述为“可由一批冷藏和存储个人口味食材的储存罐开启的打印机”。在“数字加工器”中，消费者可以使用配方储存、食材混合、层状加工等功能，烹饪出其他传统烹饪无法比拟的食材形状和口味。

“数字加工器”的图片显示其形状如微波炉一般大小，为其特别配制的银质光泽食材储存罐，高贵地架于金属套环中，仿佛在召唤“威廉·索诺玛”鸡尾酒摇酒器来与之配对。“数字加工器”的工作过程由计算机操控：食材由储存罐流入混和瓶，然后经由挤压头，最后制成做工精美、可储存的复合美食。

“科纳科皮亚”概念的最后两个成员是机器人厨师和专业搅拌器。机器人厨师将革新单一固态食材（如牛排、鱼和水果）的加工过程。专业搅拌器拥有三层独立旋转传送带，使用者可以进行更细致的食材混合过程，从而体验食材细微的不同所带来的多层次口味感受。

我希望将来呈现在消费者面前的食品打印机实体可以像“科纳科皮亚”概念机一样，简单易操作。食品打印机或数字烹饪开拓出烹饪的新领域，为工作繁忙者提供快捷的食物制作程序。食品打印机、数字食谱和相关的食品存储罐让厨师创造出更新颖、营养并美味的食品，开拓了新的烹饪市场。



图8–2　数字烹饪加工机的设计概念原型

图片来源：Marcelo Coelho and Amit Zoran

但是，数字烹饪现在仍处于概念阶段。家用电器知名厂商和家电销售商尚未推出商用级数字打印机产品。所以当今的大多数食品打印机只出现在研究实验室，在那里，学生、科学家和工程师在尽量解决不相关的工程或设计挑战时意外地找到了打印食品的方式。

淀粉类食品的确是科学家和工程师理想的实验素材，它价格便宜、种类繁多且无毒。大量方便易得的食材，可以进行随意搭配，从而帮助研究人员逼真地模拟昂贵稀有素材的材料特性。

我和我的学生们同样是在Fab@Home打印机的工程实验中意外涉足食品打印领域。我的一名研究生在工程设计实验时意外发现，蛋糕面粉是工程设计原型和打印参数调控的理想材料。蛋糕面粉可溶于水，便于清洗，甚至可以偷偷用舌头舔掉。因此，蛋糕面粉迅速成为业内3D打印实验的原料替代品。

并非只有我和我的学生们涉足3D食品打印。数年前，Fab@Home打印机问世时，我们就希望有人能制造3D打印机，用来打印塑料零件、玩具或其他家庭用品。没想到的是，Fab@Home打印机的使用者写信给我们，分享了食品打印的经历。诺伊·沙尔是肯塔基州路易斯维尔的高中生。在我们于2006年公开征集Fab@Home打印机的设计时，诺伊·沙尔就是最早的一批体验者之一。她的父亲莫尔和她一起成功组装了Fab@Home打印机，接着他们又做了一些定制化的改动，增加了一个热

巧克力打印头。



图8–3　诺伊·沙尔赢得2006年高中科学展览第一名的参赛品：打印巧克力

随后的几周里，诺伊·沙尔反复试验不同温度和打印头尺寸对实验结果的影响，通过不懈努力成功打印出肯塔基州形状的巧克力，并最终赢得了高中科学展览比赛的第一名。

打印汉堡包、肉饼和番茄酱

即使打印最简单的面粉，也需要调动整个计算机控制系统。和生活中的大多数休闲活动一样，3D食品打印远比看上去复杂。要打印食品需满足以下几个条件：首先是正确使用机械力，其次是精心设计数字“食谱”，最后是调整合适的食材进料顺序。食材必须软，可以从打印头流出；食材也要硬，可以维持打印后的形状。另外，还要考虑各种食材的固有特性、不同耐热性和多样烹饪方式等影响因素。

汉堡包的传统制作工艺并不复杂。在面包中间依次夹入烤肉、洋葱圈和西红柿片，再挤入番茄酱，一个美味的汉堡包就做成了。但对3D打印来说，这个简单的汉堡包制作过程就变得复杂了，面临着多材料食品工程的挑战。通过3D打印制作的美味新鲜的汉堡包一旦成功，将会成为烹饪工程的一大壮举。

把生碎肉打印成肉饼形状并不难，在上面加一层番茄酱也轻而易举。甚至将生面团烘烤打印成面包至多费费功夫也能实现。

食品打印的难点在于天然新鲜食材的打印。打印新鲜可口的西红柿、洋葱和生菜往往会把你引入工业化的食品生产加工范畴。3D打印新鲜的热汉堡将是工程学的一次壮举，其难度等同于打印复杂器官。因

此，现阶段研究学者和美食家还只能设计和打印简单的软食物。

基本的食品打印过程是这样的：正如所有3D打印产品一样，尽管现在还没有研发出类似“食品CAD”的商业软件，食品混合物还是要先被编写成设计文档。食品打印爱好者从网上下载食品设计文档，或者通过工程设计软件自己从头开始创建设计文档。

RepRap（一个3D打印机原型）或者MakerBot广受欢迎的复制打印机等市场上常用的打印机都可以用来打印意大利面一样的塑料条。用来打印食品的打印机必须装有特殊装备，这样才能处理食用原料。设计图源代码公开的3D打印机是满足当前食品打印定制需求的理想工具。

大多数人将塑料打印机改装成食品打印机的做法是：在印刷臂上安装注射器。有些打印机还用自动活塞，用来为食品注射器施加压力。保持压力稳定的办法是每次打印时都校正自动活塞，以保证合适的力度。人类厨师懂得控制烹饪中的力道。但是，食品打印机却不懂得控制力度。

作为商业消费打印机的领航者之一，MakerBot的“复制器”如果在原有基础上再安装一个类似于“挤压机”的部件，就能够改装成食品打印机。挤压机位于3D打印机的内部。塑料夹牢牢地把打印头固定在原处，使用者可以用一个旋盖重新把生鲜食品加载到打印头中。

通过与之相连的空气压缩机所产生的压力，打印头把食材挤出。一台挤压机能够承受高达100磅/平方英寸的压强，这个压强足够给一个自行车轮胎打气了。但公司网站警告使用者“不要超过100磅/平方英寸”。他们没有具体解释这样做可能导致的后果，但是我能想象到花生酱、巧克力酱或其他黏性的东西发生爆炸，喷得厨房满墙都是的场景。

不同的食物配方需要施加不同的压强。有时室温也会影响食品混合物通过打印头的流速。打印头的大小和直径很关键，太小会导致挤压速度过慢，太大则打印出的食物表面粗糙。

即使打印头大小合适、食材流速正常，一些生鲜食材在注射器中也不稳定。有时油会结成块状，或者食品混合物中的水会渗透到注射器的底部，导致打印出来的食品变形，和预期的形状相差甚远。

最让人困惑的是3D食品打印的烹饪方式。人们经常对3D食品打印的过程产生误解，认为打印头可以直接喷出炸好的鸡胸肉或者烤好的面包，其实不然。现在的3D食品打印技术还不能煎、烤或炸需打印的食材，但烘焙饼干还是有可能的。打印机可以通过打印头下的加热平台烘焙饼干。饼干一被打印出来，加热平台就马上烘焙生的饼干。

食品打印关键在分辨率

3D打印的食品形状是否完整和外观是否诱人，关键在于分辨率。过去人们将分辨率和食物联系在一起时，往往强调他们对饮食精细程度的坚持。但是在3D食品打印的新时代，专门谈论分辨率时，他们在说打印成品形状的完好程度。曾经的熟练铁匠、现华盛顿索尔海姆增材制造实验室学生布兰登·鲍曼表示，做曲奇饼干的生面团是3D打印的理想食材。“因为曲奇饼干在烘烤时可以保持高分辨率，足以打印出齿轮上的每一个齿。”布兰登说。而且和做巧克力或花生酱饼干的生面团不同，做曲奇饼干的生面团在烤箱里可以承受高压而不破裂。

布兰登是在做组织工程学研究项目时发现食品打印的方法的。他的研究涉及应用3D打印技术帮助重度烧伤患者被破坏的身体组织快速地重新生长，布兰登最初的研究目标是打印出可生物降解的组织框架，使其形状能够加速新皮肤的生长，随后其自动溶解，留下新皮肤独自生长。

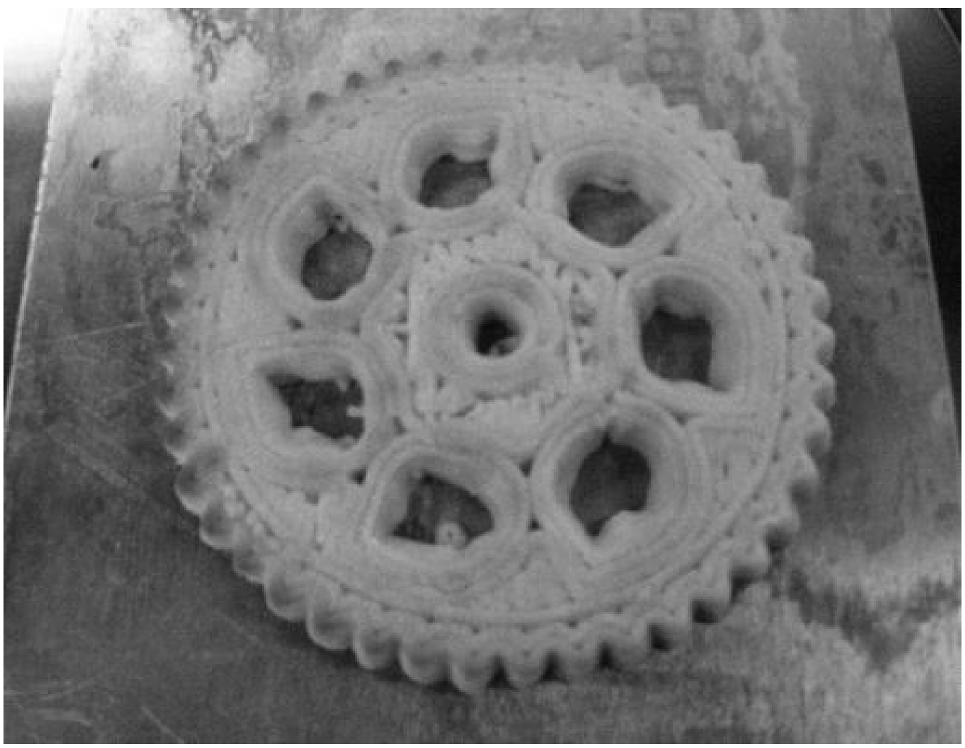


图8–4　高分辨率且美味的3D打印曲奇饼干

图片来源：Jason Bowman, University of Washington

由于人造组织的生物打印技术是一个新的研究领域，研究者只能自己探索打印的原材料。布兰登选择的是蟹壳粉，并混合了其他成分，以获得较好的黏稠度。“我花了1/4个冬天捉螃蟹取壳、烘干、磨粉并制成糊状物。”布兰登说。在普吉特海湾的冰水里捕捉螃蟹，尤其是在西雅图漫长黑暗的冬天里，不仅难熬，而且冰冷刺骨。

布兰登发现，由于打印机的问题和蟹粉糊的质地，他很快就浪费了很多辛苦得来的蟹壳粉。蟹粉糊被打印出来以后，一离开打印头就散掉了，无法保持形状。随着宝贵的蟹壳粉很快被用尽，布兰登意识到根据糊状物材料的性质，或许应该采用其他实验途径。

他需要找出一种和蟹壳粉的质地和反应都相似的试验材料。最终，他想到了这种食盐、面粉、糖、黄油和水的混合物，也就是用来做曲奇的生面团。“我确定如果我可以打印成形的曲奇饼干，那么我也可以打印出帮助烧伤患者皮肤再生的组织框架。”布兰登在电话中向我解释。

“曲奇面团的优点在于它价格便宜且易于获得。”布兰登说道，“我做面包师的朋友都认为这是一个奇怪的研究思路，但对我来说，每天在结束一整天漫长的实验工作后能够吃到曲奇饼干，这是一件不错的事。”布兰登组装了一个定制的食品打印机——一台装有MakerBot公司Frostruder（功能模块）的RepRap Prusa打印机，还配有医用鲁尔锁紧头和打印头。

下面是布兰登打印高分辨率3D曲奇饼干的配方：

1杯面粉

1/2杯砂糖

充分混合

1条黄油棒

1/2杯蜂蜜

1茶匙香草

1/4~1/2茶匙盐（可选）

用带有绿色鲁尔锁紧头的50毫升的注射器打印10~15次

用177摄氏度的温度烘烤7~12分钟

打印机通过打印头下的加热平台“烘焙”曲奇。曲奇一被打印出来，加热平台就自动烘焙生曲奇。我喜欢称这种烘焙为“联机烹饪”。

即使一次简单的曲奇饼干打印也是一项复杂的工程程序。布兰登描述了他遇到的挑战。“任何苏打粉或发酵粉都会迅速膨胀。过程中水将会使打印的曲奇瘫软、散开。”当然也有审美的因素。“在易于打印、保持高烘烤分辨率和维持口感三者之间找到平衡点，是最大的技术难题。”布兰登说。

打印的饼干里面竟然有图案

吃千层面最奇妙的感受在于它内部丰富的构造：各式不同的奶酪、蘑菇、内部黏稠的意大利面，以及烘烤后表面上那层硬硬的意大利面。但多食材的打印仍处于起步阶段。

数年前，当时在康奈尔大学的弗朗茨·尼戈用两种不同颜色的饼干面团打印出了多食材饼干。弗朗茨当时已是一位熟练的面包师，他来自以精细烘烤为傲的奥地利。事实上，他的祖母就因为甜点做得好而远近闻名，即使在糕点美食家云集的奥地利，他的祖母依然称得上是一位出色的面包师。

弗朗茨的目标就是证明3D打印技术可以用来制造拥有复杂内部结构的物体。弗朗茨的设计方案是想打印出内部藏有惊喜的饼干。最终，就像布兰登一样，他也发现了饼干面团是理想的食材。

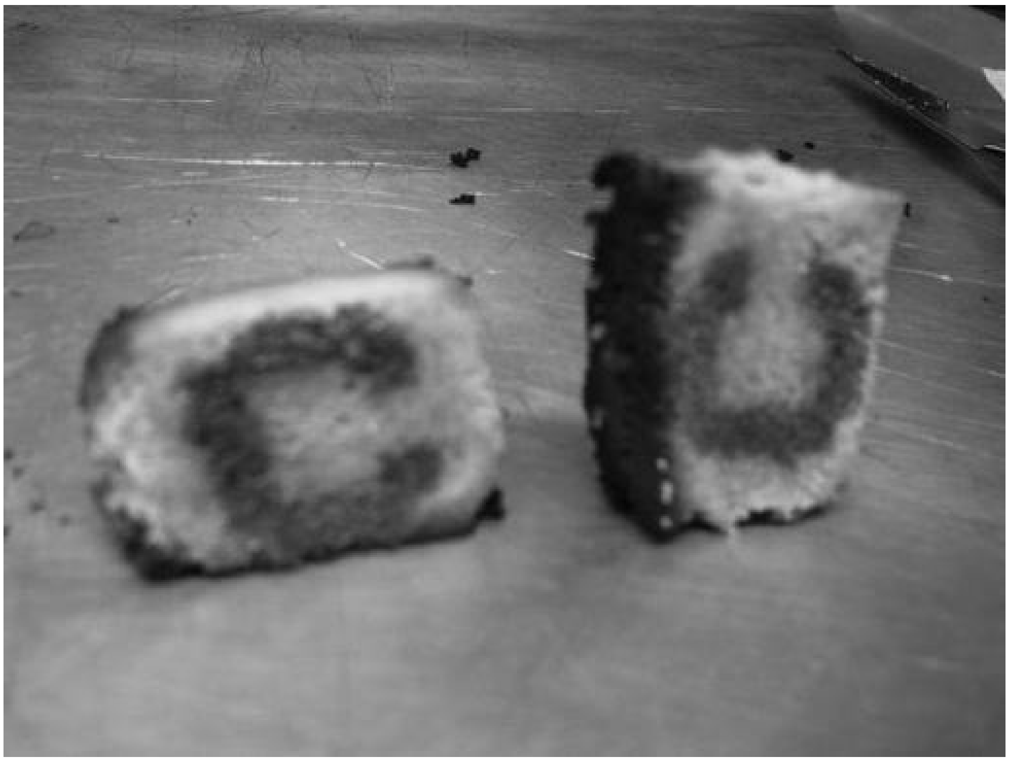


图8–5　内部含有字母“C”的3D打印曲奇

图片来源：Jeffrey Lipton and Franz Nigl

这种惊喜可能是当饼干被咬开后，意外出现的内部图案。弗朗茨创建了一个设计文档，并且用两个不同的打印头在Fab@Home打印机上建立了一个实验测试平台，一个含有巧克力饼干面团，另一个含有香草饼干面团。第一批从打印头挤压出来的巧克力香草饼干看起来很不错，表明CAD文档起了作用。但在烘烤饼干时，生饼干在烤箱中迅速变形，融化成没有固定形状的小块。弗朗茨打印出来的饼干味道很好，但看起来像灰色的煤块。更糟糕的是，内部的“惊喜”一团糟，棕白交错，一片模糊。弗朗茨历经了执着的探索，甚至还做了一些附加研究，探索巧克力和香草从打印头中挤出时，是否会表现出以前从未发现的出人意料的材料特性。随后，弗朗茨准备再次尝试。他记得小时候，祖母曾为他做过

一种外表松脆的饼干。于是他向在奥地利的家人打电话咨询，在一番解释后，他得到了最接近祖母当年所做的那种饼干的做法。

信心满满的弗朗茨·尼戈准备好了巧克力香草饼干面团，加载了打印机。CAD文档和Fab@Home打印机完美地完成了挤压和向加热平台传输的工作。接下来挑战来了，烘烤过程中生饼干能否维持内部和外部原有形状呢？令人焦虑的28分钟后，饼干被拉出烤箱。同第一次实验一样，饼干非常的美味，但不同的是，这次的饼干外形并没有走样。古老的家庭配方发挥了作用。

接下来是更大的挑战：饼干内部的“惊喜”也能保持形状吗？饼干冷却后，弗朗茨迫不及待地咬开饼干，并查看饼干的纵截面。成功了！正如设计案预计的那样，咬开之后的饼干内部完美地呈现着巧克力字母“C”。

具有内部定制图形的饼干的潜在商业市场巨大，打印好的饼干可以充当信息传递器。或许在饼干内部打印一个新的口令可以帮助IT部门将总部定期更改的密码告知顾客。

疯狂科学家公司：他们成功了

并不是所有低成本的食品打印机都使用打印头。一家小型创新公司—“疯狂科学家”的创始人勒诺·爱德曼和温德尔·奥斯卡伊发明了CandyFab，一种用热风机把粗糖融化成岩石般错综复杂形状的3D打印机。这种设计的目标是创造一种利用低成本、可循环食材的低成本食品打印机。

他们的设计灵感来源于采用激光或光源锁定动力聚合物或金属的工业级3D打印机。CandyFab用热风机融化糖，或者用它的创造者所说的“选择性热风烧结融化”手段融化粗糖。CandyFab制造的产品有着粗糙的石头一样的外表，可能这就是技术专家所谓的低分辨率形态。CandyFab应用了开源代码和商用软件。

爱德曼和奥斯卡伊用普通的家用设备创造了CandyFab。其中，熔融糖的热风器是价值10美金的空气加热器件，被温德尔在网上描述为“吹风机内加热原件的小妹妹”。他们将加热原件和冷却风扇连到一起，以易于打印过程中的温度调控。接下来将整个装置连接到一个由两个惠普绘图机改装的机械系统。机身是由普通木箱制成的，上面蒙着家用缝纫机缝制的厚帆布。



图8–6　加热原件熔融糖形成3D形状，不需要附加装配过程

图片来源：Windell H. Oskay, www.evilmadscientist.com

我最感兴趣的是CandyFab的测试过程。为了测试加热枪移动的精准性，爱德曼和奥斯卡伊在加热枪下放了一片面包。当加热枪慢慢地在面包片上写出全世界的软件研发者创建新的应用时都会写出的“你好，世界”时，爱德曼和奥斯卡伊知道他们成功了。

自身量化饮食：你再也不用担心糖尿病和肥胖症了

在饮食、健康和医疗不断被数据驱动的时代，精确的食品打印机是理想的输出设备。低成本传感器、在线评估工具、低成本DNA测试系统和极大改善的医疗诊断测试，引领了健康保健的新时代，即自身量化时代或者“数字自省”时代。对于那些计算、记录或分析他们所摄取的一切物质的人来说，3D打印机中的食材储存罐是很好的食品运载工具。

我们的身体是日渐复杂的数据的采集源。自身量化爱好者会在身上装配数据追踪器，用来记录步行距离、心跳、体重、燃烧卡路里和睡眠质量等数值。在即将到来的生物数据计量时代，伴随着私人医疗保健和家用数控食品打印机的出现，将是怎样一种情景！

未来，医用3D食品打印机也将顺理成章地被用来打印麦片卷和活性增强糖果。当然，应用领域并不局限于此。厨房用的3D打印机将会依据使用者的医疗状况，每小时进行更新。它会利用内置的智能数控系统，依据使用者每日不同的需求量为其量身打印食物。

在人类发展史中，自身生物计量监控尚处初级阶段。人们目前只会简单记录心跳、呼吸速率、舌头表面形态或者排泄物的形态和气味等数据，但现今先进的医疗技术已经使医疗机构以外的人们能够追踪、监控甚至预测身体状况，其他领域也因为不断增长的可获取的数据、计算能力和互联网而发生转变。人们可以预测并管理一周的睡眠质量和周末的低落情绪之间的联系。

我和一位老朋友在旧金山湾一起吃早餐时，第一次接触到了“自身量化”的概念。当时，她的另一个朋友也加入了我们，她正在打造一款人们可以上传和分析身体数据的网络应用程序。当我满足地喝着咖啡、嚼着培根时，我发现这位西海岸的朋友正在喝无咖啡因的绿茶、吃蛋白卷。

我们的话题围绕着她的网站展开，那是一个人们可以记录、追踪并讨论自身生物量化数据的网站。网站使用者可以在网站上记录他们的心跳、他们当天摄入的食物和锻炼的等级。一些使用者还会上传更新血糖值，也有人会进行线上自身精神状况评估，并且记录服用的药物。

在讨论中，我意识到食品打印机将是数字时代完美的食品制造技术。糖尿病患者可以上传血糖数据，然后用软件计算出他们下一餐的营养均衡食谱，并将食谱发送给厨房里的3D食品打印机。注重饮食健康的用户可以用已经嵌入的预先选定的营养素打印土司早餐。

用户可以使用数控食品打印按照特定配比调整食谱中的营养成分比例，如人们可以依据自身生物统计数据及某一天的活动量使用联网的3D食品打印机调整食物摄入。同时，食品打印机能够帮助我们这个超重的社会远离批量生产的品种单一、保质期很长的加工食品，取而代之的是新鲜打印的食物。

专业的3D打印机厨师必须严格遵守纪律。比如，读取生物测量数据后，3D打印机会拒绝给一个早晨没有去慢跑的电视迷提供比萨，取而代之的是新鲜的沙拉和全麦面包。

软件大亨和数学天才史蒂芬·沃尔弗拉姆是一名专业的资深私人数据收集者。他在公司网页的微博中写道：“我对数字感兴趣很久了，很久以前就开始收集，我原以为有很多人在做这项工作，实际上没有多少人做，所以我现在很可能建立了一个世界上最大的个人信息数据库。”

几十年来，沃尔弗拉姆详细地记录自己的日常习惯，如每天敲击键盘的次数、走过的台阶数、睡觉的时间和打电话的时间。他写道：“为了认识自我，我设置系统每天自动给我发送邮件记录前一天的数据信息。”

沃尔弗拉姆是数据分析先锋。然而，随着越来越多的人热衷于分析

自身数据，沃尔弗拉姆的习惯很快会成为常态。自身量化运动正快速发展。从某种程度上来说，这是一门关于DNA分析、传感器和分析工具的技术。同时它又体现了人与自己身体的关系。

生物统计数据和精确数控的多食材食物生产将开辟健康新领域。3D打印机配备上满足身体需要的食材盒以后，能实时读取来自身体感应器的无线信号。此时3D打印机将集私人厨师和营养师角色于一身，在你打开房门的同时，为你打印出美味的食物。此外，打印机能够读取车载GPS数据，它能够判断出你是否在堵车或者加班。

打印的食品不仅仅是加工食品

打印出的食物即使营养健康，人们也会产生质疑并有抵触情绪。3D打印食品是加工食品，和生物打印、组织工程和粒子加速器一样，食品打印可以被看作对自然界的直接挑战。

加工食品因加剧了现代社会肥胖症、癌症和心脏病等屡遭责备（事实上也确实如此）。发展中国家的加工食品批评家指出，从遥远地方进口的批量生产的加工食品代替了传统的更加环保营养的食品生产。反式脂肪酸、精加工谷物、高盐和高果糖玉米糖浆不利于身体健康和保持身材。

批量生产的加工食品有时被称为“流行食品”，它们容易发生大规模细菌污染。已经有数百名顾客因在快餐连锁店食用细菌污染的肉而生病。一种典型的加工食品通常会添加几十种人造原料，以改善食品的质地和颜色，延长保质期，使食品吃起来更甜或者味道更好。

加工食品的最大缺点是它口感远远不及自然食物。诚然，薯片味道相当不错，但是7月份在新泽西路边卖的从树上刚摘的梨与副食品商店中出售的批量生产的梨相比，两者的口感相差甚远。

难怪提到3D打印食品，公众大多打个冷战或者笑了起来。其实，这是意料之中的。美国流行杂志《读者文摘》中的一篇文章清楚地描述了加工食品的缺点：

> 遗憾的是，大多数加工食品含有甜味剂、盐、人造香料、人造脂肪、色素、改变质地的化学制品和防腐剂。但问题不仅是加工食品都添加了什么，还有失去了什么。加工食品通常缺失了保护心脏的天然营养素，如可溶纤维、抗氧化素和有益的脂肪。含有添加剂并失去了营养素的加工食品对我们的身体来说就是一场灾难。

加工食品的危害不是新鲜事。20世纪早期，大量患者涌入密歇根州巴特尔克里克由凯洛格兄弟创建的巴特尔克里克疗养院进行治疗。很讽刺的是，凯洛格兄弟出售著名的加工食品凯洛格麦片粥早点，并以此致富。巴特尔克里克疗养院当时使用的是解决健康问题的根本方法，患者

食用低脂肪、低蛋白食物，并进行大量的运动。凯洛格兄弟建议他们的病人："要想病愈，像黑猩猩一样吃吧。"

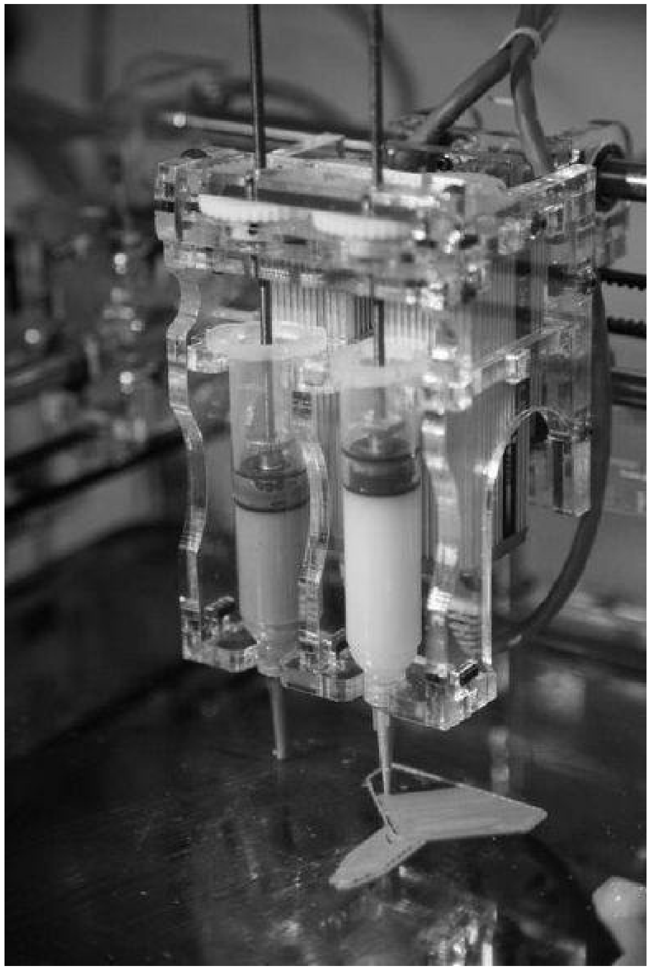


图8–7　芹菜和扇贝打印过程

图片来源：Daniel Cohen and Chef Dave Arnold, French Culinary Institute, New York

事实上，单从饮食角度讲，凯洛格兄弟倡导像黑猩猩一样饮食是正确的。但是，与黑猩猩不同，人类不能以从周围环境中找到的生食物为主食。黑猩猩每天花几小时咀嚼食物以从中获得身体所需的营养物质。

与很多人的观点相反，加工食品是现代人健康长寿并享受悠闲时光的主要原因。《赞美快餐》一书的作者雷切尔·劳丹在一篇文章中对她所称的"烹饪卢德运动"提出质疑。工业化食品大大改善了人类的健康。食品加工、保存和运输技术使得营养不良的状况有了好转，人们有时间从事其他活动。

劳丹写道："机器烹饪反对者从来就不曾有过辉煌，他们的信仰不是基于历史而是基于童话。"食品技术使我们获得了解放和健康。比如冰

箱这种新技术延长了食物的储存时间，农业肥料使庄稼长势更好。

劳丹还介绍了加工食品常被忽略的优点："烹饪现代主义证明了人们想要的是可以保存的新式且方便的工业化食品、价格实惠便民的优质食物。加工食品使得人类长得更高、更壮、寿命更长。"

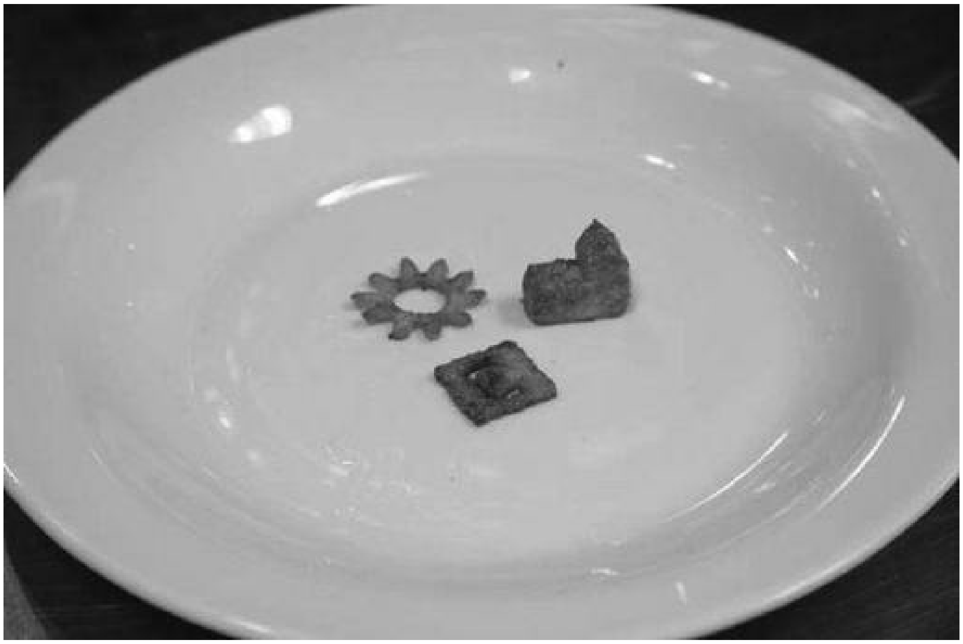


图8–8　3D打印的炸扇贝

图片来源：Daniel Cohen and Chef Dave Arnold, French Culinary Institute, New York

腌制、硬化、装罐和真空包装等保存技术使得加工食品既有营养又便于运输和储存。现在，人们能够享受千里之外的食品。而且加工食品不容易腐烂，能够运输到很远的地方。以前只有贵族才能享用到的美食，如今也在大众中普及。

数字烹饪或者食品打印会像其他食品保鲜技术一样给人类健康和社会带来益处。生物统计数据和计算能力会带来新的成分组合和食品形状，食品打印会带来新一代健康、新鲜、美味且实惠的加工食品。

从加工食品到合成食品

如果对加工食品还有争议，完全合成食品怎么样呢？我提到的"合成食品"是一种广义的概念，指可食用的营养又美味的食品，但这些食品不是由大众认为的天然的或者能够认出的基本原料制作出来的。

有两种方法可以3D打印合成食品，相对简单的一种是：将食材糊如大蒜干贝混合，然后3D打印成新形状。第二种较现代的途径是：将基本化学材料糊混合，用数字食谱将原食材3D打印成"真实食物"的复制品。

如果你拆解过激光打印机，你可能会记得墨水只有三种基色—蓝绿色、紫红色和黄色，却可以打印出彩虹的七种颜色。按照精确比例将几种基色混合，激光打印机就可以打印出外观漂亮的彩色文件。把基色打印的概念用于食材打印，一个丰富多彩的美食世界的大门就打开了。仅使用几种基本的原料，未来的食品打印机就可以用不同的排列方法组合成原食材，为人们提供无数新的多样化的食品种类。



图8–9　用于食品打印实验的基本食物成分

图片来源：Cohen, Lipton, Cutler, Coulter, Vesco, Cornell University

也许有一天，我们将打印出我们熟悉的营养材料合成制作的美食，比如带有土豆泥和西兰花的烤鲑鱼。我们还可以打印合成鱼肉和牛肉，可以减轻过量捕鱼和养牛对环境造成的破坏。打印的合成食品还可以保障士兵在恶劣环境下的食品供给，为难民提供便携不变质的食品。

我们的地球正面临着人口增长和对肉类需求增加的挑战。目前，地球上有两大食物资源是相对充足的：昆虫和水藻。在很多国家人们都烤蚂蚱和蛹，但西方人不喜欢吃昆虫。

两位来自荷兰大学的昆虫学教授马塞尔·迪克和阿诺德·范胡斯极力宣扬将昆虫作为食物。在《华尔街日报》的一篇文章中，他们提到吃“六腿美食”的益处。

> 昆虫是高蛋白、低脂肪、富含维生素B和铁、锌等矿物质的理想食材。与牲畜相比，昆虫容易饲养、数量多且排泄物少。在已知动物种类中，80%为六腿昆虫，其中1　000多种可食。至于味道，人们常用“有坚果味”形容。

荷兰某些饭店已将昆虫（通常是蝗虫和甲虫幼虫）列入菜单中，但尚未被食客广泛接受。人们或许永远不会愿意吃一条完整的刚烤好的甲虫，但如果你将昆虫肢解，再将它们撒入彩色凝胶中，就可以打印成美味的肉团状。

当丹尼尔·科恩还是个研究生时，他曾在毕业论文中探索合成食品的生产过程，将其描述为“自下而上的食物设计方法”。科恩的角色是培训工程师，而不是厨师。为了开始合成食品3D打印的探索之旅，他的第一站是到街对面著名的康奈尔大学酒店管理学院为课题组雇用厨艺精湛的学生。

科恩的目的是用尽可能少的食材打印出尽可能多种类的食品。这是一个优化的问题，要用少量的原材料形成最大数量的组合。与此相反，酒店学校的学生有不同的观点，他们对这项挑战很感兴趣，因为这与他们的人造食物增强剂课程有关。

科恩和他的酒店学生团队有条理地开始将基本食物原料混合成尽可能多种类的混合物。他们按照味道、颜色、人造纤维、营养添加物和变形因子打印混合物。他们加入不等量的种类不同的凝胶和树胶。像查理巧克力工厂的欧伦比人一样，学生们不分昼夜地做着食品打印实验。每天科恩都会向我展示他们的新成果，如与牛奶类似但外形是软立方体，或者吃起来像香蕉的棕色蘑菇。

从食物工程的角度看，这个课题无疑是巨大的成功。但从烹饪学的角度看，它却是巨大的失败。打印出的合成食品是味道还不错的可食用品，但它们太奇怪了。没有人（甚至包括课题组内的研究人员）愿意试吃打印食品，更不必说在杂货店购买，或者在饭店享用了。



图8–10　3D打印的章鱼形玉米面包

图片来源：Jeffrey Lipton, Cornell University

科恩的食品工程证明，食品加工既是一门艺术也是一门科学。消费者无法预测合成食品会以怎样的形式出现在市场上，但至少要以消费者可以识别的形式出现。比如，草莓味的糖果必须是红色，合成蛋白打印的人工鸡肉的形状必须看起来像鸡、有鸡肉的味道和鸡肉的触感。最终出现在烹饪市场的3D打印合成食品必须有仿真的形状，比如看起来像一盘美味的寿司或一只烤鸭。

打印高仿真度的合成食品并非易事，打印水果或蔬菜更困难。打印新鲜天然食品的挑战难度类似于医学研究人员打印活体组织的难度，打印天然食物的复杂化学物质以及设计和构成超越了我们现有科学水平的其他材料组成。

3D打印杀手级应用程序

3D食品打印将改变我们的饮食方式和保健习惯。当数字厨房像个人计算机一样被广泛接受时，或许我们的冰箱里就可以看到盛有冰冻黑巧克力糊和香草鸡肉的食材储存罐。面点爱好者也可以下载蛋糕食谱，打印出制作复杂程度足以与知名大厨所做糕点媲美的美味油酥糕点。家用食品打印机将允许用户设定食物质地和酥脆度，或者写一个食物咬开后才可以看到的“信息”。远隔两地的情侣和家人可以分享同一个蛋糕食谱，并且通过网络摄像头一起打印和品尝美味的糕点。

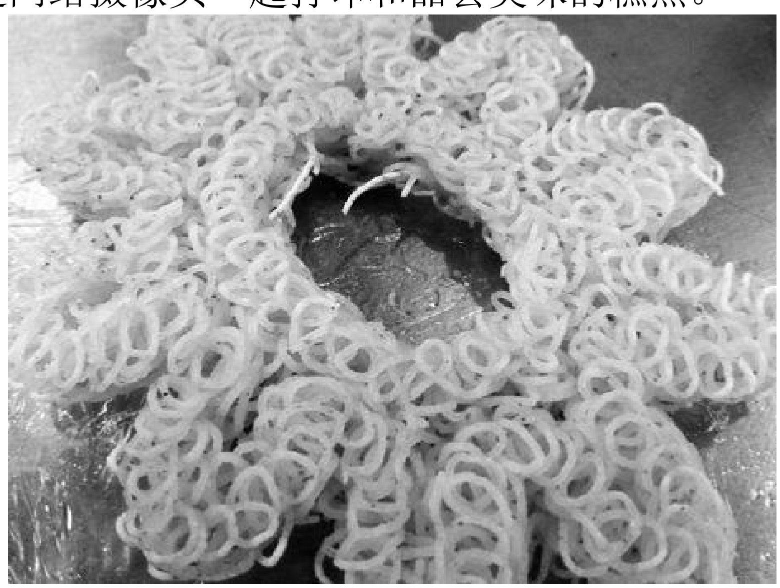


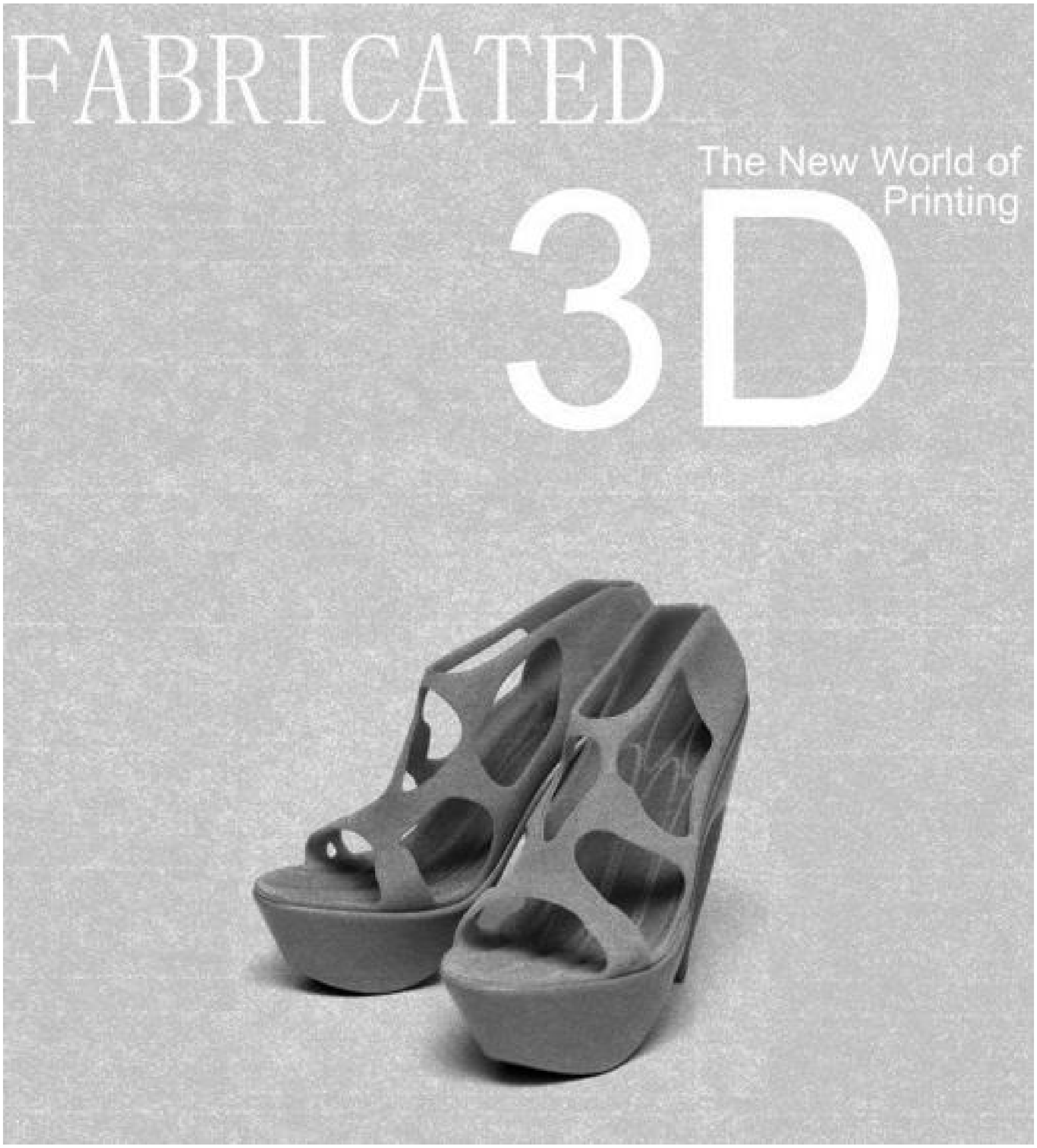
图8–11　花朵形状的玉米卷面，油炸味道更佳

图片来源：Jeffrey Lipton and Chef Dave Arnold

我不知道将来是否每家都会拥有3D打印机，但如果让我打赌某种3D打印技术将成为家用电器的主流，我愿意购买家用食品打印机。食品打

印机让我回想起个人计算机的发展历程。无聊的视频游戏促使很多人买了家用计算机。3D食品打印或许将成为另一个“个人计算机”，无聊的活动最终会成为杀手级应用程序。

第9章　教室里的工厂：3D打印颠覆传统教育方式



几年前，我被邀请到我二年级的儿子的班上讲解3D打印。那时我正好在大学里教授工程学课程，所以我立马同意了。“不错的主意！”我对我当时的研究生埃文·马龙说，“这会很困难吗？”

在演讲之前的几周时间里，我向儿子阐述了一些3D打印演讲的想法，但都被坚决地否定了。孩子们喜欢关于3D打印的演讲吗？不！一些关于打印玩具的电影怎么样？或者关于使用设计软件的课程怎么样？全都被否定了。

随着日期的临近，我依旧没有好的想法，埃文和我感觉到意想不到的怯场。最后，灵感出现了：3D打印橡皮泥怎么样？孩子们了解橡皮泥，不是吗？

有了可行的演讲计划后，我们设计打印一架航天飞机，机体由红色橡皮泥打印，翅膀和尾巴由蓝色橡皮泥打印。演示的日子终于到了，我们带着Fab@Home打印机走进教室。Fab@Home打印机是我们的研究实验室开发的一台小型的开源3D打印机模型，它的尺寸和微波炉差不多，具有透明的塑料壁，这样人们能够看到打印的过程。为了这个特殊的演示，埃文特意打造了一个具有特大号打印头的3D打印机，这样就能够更快地打印出航天飞机，大约3分钟，我想这还在孩子们的忍受范围内。

像皇室成员巡游一样，Fab@Home打印机被放在二年级教室里的一个高台上，墨盒里装着红色和蓝色橡皮泥。打印机庄重地放在那里，孩子们热情地注视着它。向班里的孩子们简要介绍后，按动了“打印”按钮，Fab@Home打印机的3D打印头开始来回压缩，按照计算机设计文件中迷你航天飞机的形状，慢慢地挤出红色和蓝色橡皮泥。

孩子们被吸引住了。

一些孩子随着移动打印头有节奏地晃动，另外一些孩子则随着打印机的电动机改变的音调哼哼出声。几分钟后，一架微型橡皮泥航天飞机出现了。航天飞机从打印机出来后，我把它举得高高的，这样孩子们可以看得更清楚。

沉默了一会儿后，孩子们踊跃举手提问。一个孩子问，我们能够改变翅膀的形状并且再打印一架航天飞机吗？另一个孩子问，我们是否带了更多不同颜色的橡皮泥来打印更多的航天飞机？还有一个孩子抓着一罐从教室架子上拿下来的橡皮泥问，一罐橡皮泥大概能打印多少架航天飞机？另外一个具有企业家倾向的孩子还做了计算，按现有橡皮泥原料市场价格计算，一架航天飞机的售价大约是5美元。

英国克利夫登学校的设计和技术课程的教师戴夫·怀特曾经说过：“如果你能抓住学生的想象力，你就能抓住他们的注意力。”

边做边学：孩子们的工程学

想象你是四年级的教师，你想知道设计软件和3D打印能否帮助你讲解基础物理和数学。你需要传授核心概念，如动能概念和一些简单的数学比例。也许你可以通过传统的基础数学和科学课程计划讲解，但你是否愿意尝试一些不同的方式，看看会发生什么？

我们大多数人意识不到公立学校里所教的内容是上千双无形之手的

成果。一位小学教师不仅仅是设计出她认为学生们会喜欢的课程计划，至少在美国和很多西方国家，课堂教学就是校园墙外大世界一个生动逼真的缩影。

国家建立了教育标准，专家和商业出版商共同设立了一些课程，父母、政府官员和学校董事会最终决定什么样的教育比较好。如果你是教师，你将从哪里开始？

一种可能是采用Fab@school（学校工厂）试点项目。Fab@school可以帮助教师创造集设计和3D打印于一体的课程，以传授核心数学和科学概念的课程。该方案项目的目的是创造儿童工程师，激发年轻人对科学、数学尤其是工程和设计的兴趣。该试点项目由国家自然科学基金、摩托罗拉公司和麦克阿瑟基金会资助，弗吉尼亚大学儿童工程集团的教授格伦·布尔则是该项目的领导者。

该项目的课程计划由教授、教师、图书管理员和研究生组成的工作组制定和测试。迄今为止，大约有350名四五年级学生和10名教师体验了该课程。



图9–1　两名小学生与一台Fab@Home打印机一起工作

注：该打印机的功能得到了改进，能够用橡皮泥、切削泡沫塑料以及其他数字生产制剂打印。

图片来源：Glen Bull University of Virginia

格伦和他的团队创立了一个叫作“边做边学”的课程计划，讲述了一个名叫威廉姆斯的非洲小男孩的故事。威廉姆斯的村庄没有电，他利用剩余的拖拉机部件、废金属和一本关于能源的书，制作他自己的风力发电机。学生们可以跟随威廉姆斯的故事，设计、测试和3D打印他们自己的塑料风力发电机。用放在教室前排的风扇驱动时，这个风力发电机可以点亮一个电路板。

利用大约20页的彩图和清晰的图解，学生可以通过一系列的动手实验了解动能、电流和传动比等抽象概念。在“边学边做”课程中，学生们通过软件引导的切纸机制作风车叶片，并利用Fab@Home打印机制作风力发电机的塑料齿轮。

学生们两人一组。课程开始了：

> 在你家里有好多东西需要插座，例如冰箱、电视、灯泡，甚至一些科技产品，如iPod。给这些设备提供电力的电来自于发电厂，发电厂能够用风、水、煤甚至核燃料发电。

故事继续：

> 但你知道吗？全球70亿人口里，约有1/4（即15亿人）还生活在没电的世界里。如果这些人在夜间需要灯光，根本做不到，除非像威廉姆斯一样自己发电。

正如每一位发明家的经历，在故事里，威廉姆斯尝试、失败、再尝试，最后威廉姆斯找到了最佳设计方案。在故事的结尾，他的“涡轮开始旋转，刚开始缓慢地转动，然后越来越快并开始输出电能，邻居们很快看到威廉姆斯的房子由四个电灯照亮，即使在最黑的夜晚也一样”。

在我参观的教室中，我看到两个小女孩在风扇前测试她们3D打印的风力发电机。女孩们告诉教师，她们的风力发电机不工作了。拆开风力发电机后，她们发现了一个电路板存在问题，一根线连错了地方。她们尝试着纠正回来。成功了！她们的小灯泡随着涡轮叶片转速的加快开始发光。

这些女孩利用动能发电，并积极解决当中的问题。通过让学生们看到手中的设计问题，“边做边学”课程向学生们介绍了“设计准则”的想法。该课程中引入的设计标准是“你制作的东西人们能够使用并愿意使用”。

我注意到学生们掌握了另外一个核心工程概念：每分钟转数（RPM）。一个男孩告诉他的搭档，他们需要“计算出风车每分钟的转数”。之前，教师在每台风车上贴了一个闪亮的贴纸，并通过一个小的转速计帮助孩子们计算叶片转速。由于装上了转速计，孩子们不用依赖钟表就可以计算叶片每分钟的转速。



图9–2　这是一个完整的风力发电机，齿轮是3D打印制作的

图片来源：Glen Bull University of Virginia

参观完几个开展Fab@school项目的教室后，我咨询格伦·布尔，为什么亲身体验是如此强大的教学工具。格伦解释说，看其他人解决问题不能帮助学生掌握科学、工程或者数学。“一个带有数字的涂料工具箱从来没有使任何人成为艺术家。同样，如果一个小孩仅仅坐在那里看3D打印机打印，他学到了什么？什么也没有。”

Fab@school项目的魅力在于，设计软件和3D打印都不是课程计划的焦点，而是利用技术通过应用抽象概念解决有趣的问题，进而帮助教师和学生了解并掌握抽象概念。现在，设计软件和3D打印机正在降价，教师和学生能够直接体验设计和工程加工。将来，格伦和他的同事打算创立更多的类似于“边做边学”的课程，并把Fab@school项目推向中学。

从高中阶段说开去

3D打印机帮助高中设计和工程学生更快地失败。等等，这听起来不对。然而，在产品设计、工程和其他解决问题的行业中，失败得越早，你就能越快地找到解决方法。

试想如果一群土木工程师没有早点儿发现问题，而是在隆重的剪彩仪式后一周发现他们的吊桥设计存在致命的缺陷，那将是多大的灾难。桥梁断裂和坍塌将对人们的生命构成威胁，因而项目将被迫重建，代价高昂，士气也受打击。

多亏了3D打印机在快速原型化工具方面的价值，它可以帮助学生更早、更安全地失败。设计过程是基于设计者反复测试设计理念，类似于作家不断修改书稿的过程。明尼苏达的一家3D打印公司Stratasys公司负责教育项目的董事杰西·罗森伯格解释说，学生们发现Stratasys公司的3D打印机很有用，他们能够尽早发现设计错误，而不是投入时间和材料做一次赌博。

当我与杰西交谈以了解更多关于Stratasys公司3D打印机生产线的情况时，他说："回忆我上高中工程课时，分给我们的一个典型项目是用牙签和胶水建一座桥梁。"换句话说，原型设计不是设计过程的一部分。杰西继续说：问题在于，你在项目临近结束时才能发现桥梁是否会失败。如果有3D打印机，你不必重做就能发现问题，并进行调整。

英国克利夫登学校设计和技术课程的教师戴夫·怀特已经给初中生和高中生讲授了25年的设计和技术课程。他开玩笑说，在教室里放一台3D打印机能够帮助学生"赶走没有用的想法"。两年前，他在他的教室里装了一台可运行的3D打印机。

我从戴夫那里了解到，学生们很少利用3D打印机打印他们所有的方案。通常情况下，教室的3D打印机用于制作更大更复杂的产品，可能是机器人的部分零件，或者赛车模型的车体。学生们使用3D打印机制作他们无法在别的地方找到的特制模仿品。

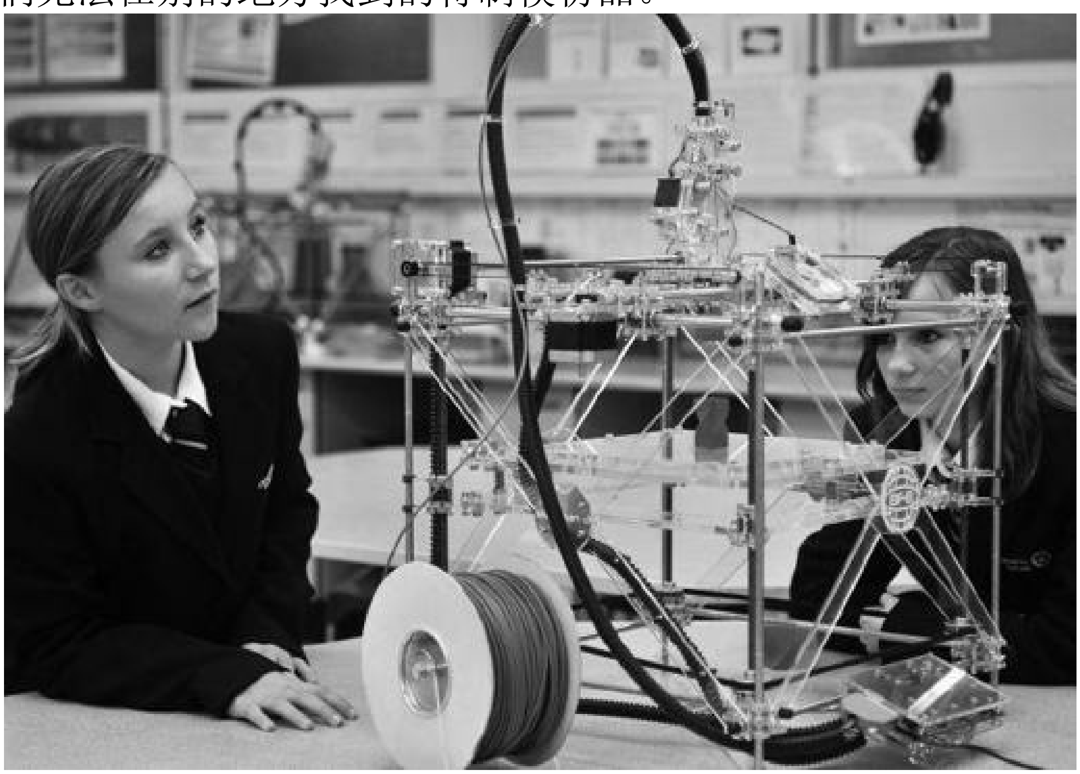


图9–3　英国两个高中生与RapMan 3D打印机一起工作。

图片来源：Dave White, United Kingdom

戴夫受欢迎的设计课程内容是要求学生设计和3D打印人们能够使用的一些物件。戴夫解释说："我发现让学生们把他们的数字设计变成现实的东西，他们就会从中学到更多的东西。在计算机上看起来很好的物体，打印出来经常不尽如人意，比预想的要么偏大，要么更笨重。"

戴夫讲述了一个学生的经历，这个学生设计了一个iPod支架，能够固定在自行车车把上。"在设计文件上他的iPod支架看起来很好。但当他打印出来时发现，这个支架并不适合自行车车把，因为它太大了，并且不太符合空气动力学。"这个学生重新用软件绘图，调整他的作品，使它的外观呈流线型，同时也更方便用户的使用。

戴夫说："有些学生经常会有一些疯狂古怪的想法，并花费许多时间动手去做，最后发现他们的设计在现实世界无法工作时，已经太晚了。相反，他们应该反复设计，边测试边改进。他总结说，学生们应该设计、打印、尝试、再尝试。"

戴夫与学校其他课程的教师合作。他解释说，其他教师正在尝试应用3D模型软件和3D打印机教授学生设计和打印DNA结构、细胞模型或者具有重大历史意义的物体的复制品。目前地理课程的项目就是一个很好的例子。

针对于地理课，戴夫帮助学生设计圣海伦火山1980年喷发之前的地形。学生们首先打印一座喷发前的火山，然后再打印火山喷发后的地形模型，中心带有一个敞开的火山口。他说："在人文艺术课程中，学生能够设计和打印艺术雕刻的样式或者历史建筑物。"

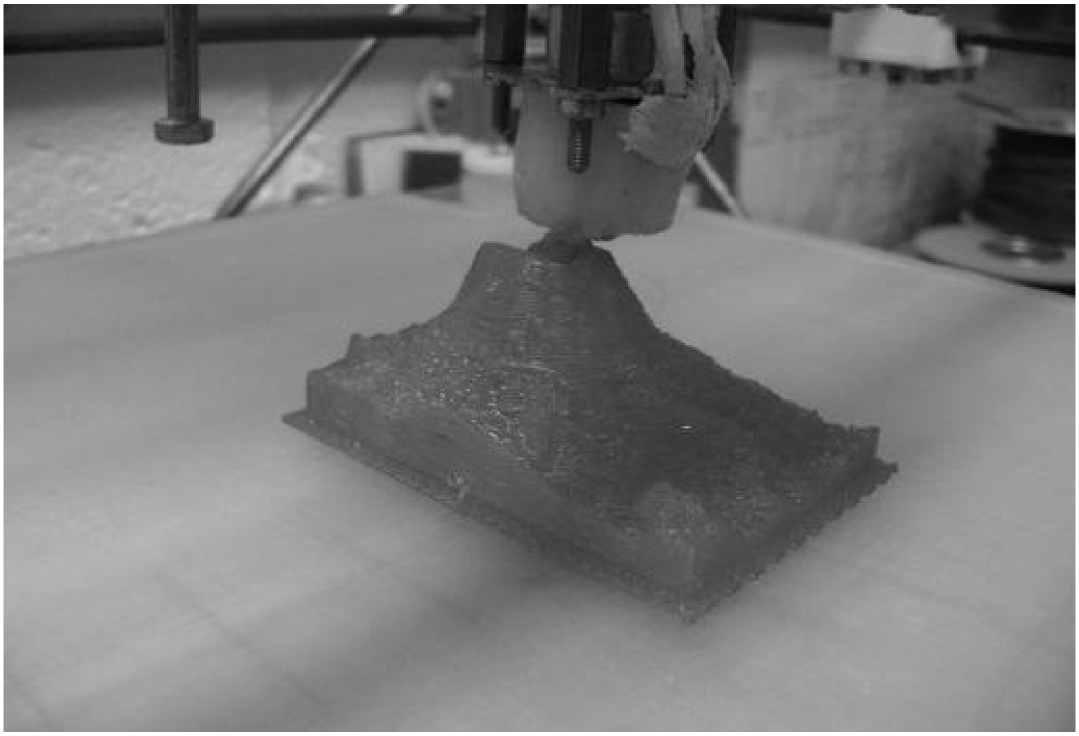


图9–4　圣海伦火山3D打印模型

图片来源：Dave White, United Kingdom

尽管高层论坛上关于设计和工程教育所起到的关键作用的言辞不绝于耳，但无论美国还是英国的标准课程里都没有工程或设计技巧。虽然有大量专门的数学和科学课程，但工程学受到的关注相对较少，即便有关注，也只是关注合成与设计。因此公立学校很难证明在它们的预算中有必要的技术开支。在课堂上，教师一定要坚持自己的选择，即在课程计划中使用3D打印和3D建模软件。

在美国，国防部和国防高级研究计划局对专门为高中和初中提供3D打印机及其场所的项目提供了资助。虽然很有用，但这些试点方案却把公立学校排除在外，不受政府或公司资助的公立学校的教师想尽办法为课堂采购3D打印机，并获准在教学中使用3D打印机。

英国的情况类似。戴夫·怀特的3D打印课程既没有获得外部机构资助，也没有得到学校的财政预算支持。“我教室里的大多数资源是要来和借来的，当然不是偷的！”他开玩笑地说。克利夫登学校附近有一家小公司，它很慷慨地资助给学校一台能用的RapMan 3D打印机。

戴夫打算继续进行下去，但他说：“我在课堂之外花费了大量时间讲解这些新技术，因为这是我所相信的。学校不能只是告诉学生如何成为一个木匠或钳工，我们必须传授他们技术，这样在将来的工作岗位上才能够使用。”

学习应该是令人愉快的

在美国，每隔几十年，为了应对可能的国家安全威胁，教育专家都会通告公共教育危机，STEM（科学、技术、工程和数学）教育都不止一次地成为争论的焦点。20世纪50年代大家关注的是，与美国相比，俄罗斯公立高中的毕业生继续进入大学学习工程学的人数是美国的2倍，毕业后成为工程师的人数是美国的30倍。

现在，不再是冷战时代的苏维埃“红色威胁”，迫在眉睫的经济威胁来自低工资制造业国家。随着现代社会的发展，美国公立学校系统不再培养足够的将来成为科学家或工程师的学生。由联邦政府机构、教育家、经济学家编写的大量报告声称，除非公立学校改进传授科学和数学的方法，否则我们的国家将在经济的战场上战败。

我讲这些的原因是，3D打印的教育价值经常被政策制定者、教育家和纳税人作为改进STEM教育的一种方法。议案通常是这样的：如果公立学校的STEM课程更吸引人，将会有更多的学生决定在大学甚至研究生阶段学习工程。3D打印机将帮助吸引学生学习STEM课程。公立学校的3D打印将使更多训练有素的工程师和精通科技的人成为劳动力，结果将形成企业家精神和工艺革新的浪潮，而更多的创新将创造新的就业岗位和高技术企业。

或许这是一个事实，3D打印机将激发新一代学生投身科学、数学和技术的热情，我希望是这样。但关注于STEM课程的问题在于，考虑到对3D打印和设计教学工具的投资，这些令人兴奋的教学技术将面临限定教学范围的风险。

相反，设计和制造工具（例如3D打印机）能够点燃学习所有学科的热情，包括没有资金支持的人文艺术学科。几十年前，计算机仅被认为与STEM学科有关，而如今它已经改变了艺术、写作和历史等科学与数学之外的领域。

对设计和3D打印进行广泛思考带来的另外一个好处是，它们作为教学工具能够帮助在主流教育中表现不好的学生。“理论第一”的教育方法不是每个人都擅长的，一些学生在没有看到或者触摸到学习实物的情况下，很难掌握抽象概念。

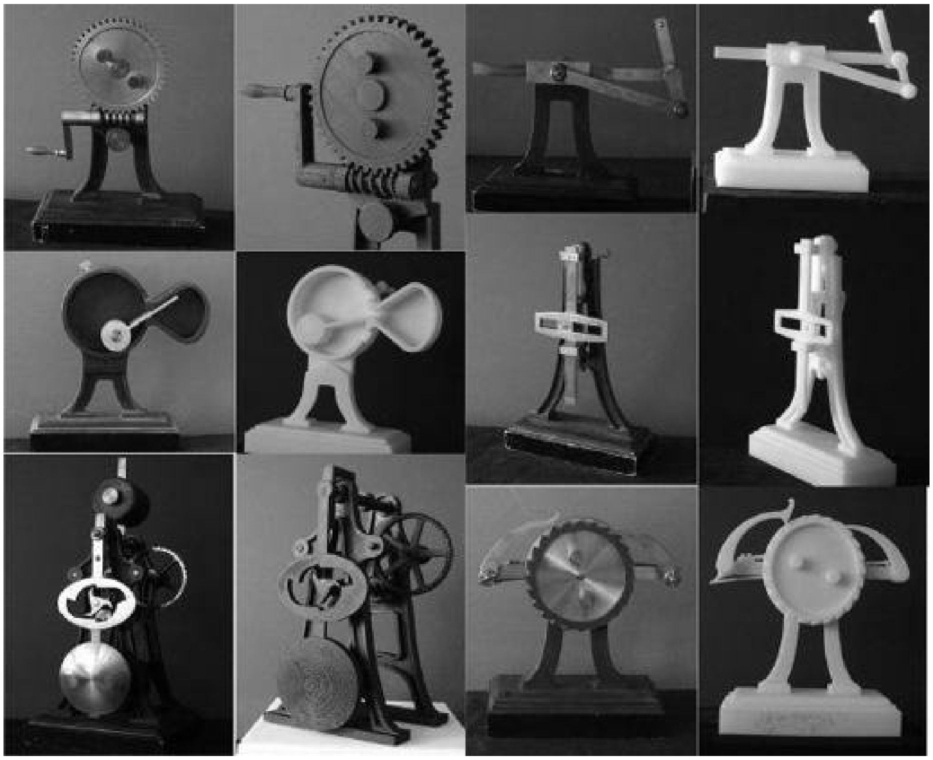


图9–5　博物馆展出的19世纪机械和下载后3D打印的复制品
图片来源：kmoddl.library.cornell.edu

视障学生可以从触摸物理模型中学习抽象概念。另外，对于所有的学生，无论吸收新知识的程度如何，在物理媒介里重新制定的学习课程可以巩固他们所学的知识。最重要的是，许多学生喜欢动手学习。

我们大多数人低估了这样一个事实，对于很多学生来说，学校里的一天是漫长而可怕的。用格伦·布尔的话说："学习应该是令人愉快的。"听起来也许很通俗，但如果你是七年级的学生，什么类型的课程计划能够使你期待每一天的课程呢？

让我们看看纯粹教学范围内的3D打印吧。让学生接触设计工具有益于他们的学习吗？也许有些教师已经注意到，有些学生在传统教学方法中做得不好，但接触到他们自己的设计工具和产品时也许会做得很好。

考试分数与动手能力

当我与戴夫·怀特交谈时，他提供了一些观点，这些观点和我从其他工程和设计课程的教师那里听到的类似。近年来，戴夫了解到有些学生非常精通他们的课堂作业，这些学生被称作"课本通"，但这些学生并不都是他眼中的好学生。他说："当我了解到学生对教科书没有兴趣时，我并不感到吃惊，但一旦他们接触到一个项目的设计部分，他们恢复了兴趣，布置的书面作业也能很好地完成。"

格伦·布尔也证明了在精通理论和实践之间存在着差距。他说："我

了解到在仿真环境下，有些学生的电路设计可以做得很好。但当面对真实的电路时，这些学生经常失败。纯粹的理论学习改变着我们的大脑，使我们的学习僵化。关于物理维度，以及伴随着理论维度的经验学习，还有很多地方值得挖掘。”

先前的研究支持了格伦·布尔的第一手经验。在1995年，一位研究者对比了学生制作真实电路的能力和他们该科目的考试分数。学生通过动手作业，如制作并测试一个电路，证明他们的实践知识，同时对学生提出一个关于电路的问答测试。研究结果表明，考试考得好的学生，当面对真实电路的时候并不一定精通。换句话说，笔试分数并不是一个可靠的测试学生动手能力的手段。

该研究提出一个问题：哪种方式更有效，即通过讲解理论传授学生新的信息然后应用，还是通过动手体会第一手经验后进入理论学习？对于通过把设计软件和3D打印机编入课程，尝试指出如何提取教育价值的人们来说，这是一个非常重要的问题。

结果很明显，学生是不同的个体，不同的学生喜欢不同的事情，甚至每个学生学习爱好的转移也依赖于科目和新知识的复杂性。

忘记学习方式

我们希望人们尝试设立3D打印和设计软件课程时不会把这些技术局限在具体的学习方式。学习方式的概念对于教师、父母、出售教育课程的公司和学生具有巨大的号召力，问题是学习方式的存在没有科学性。事实上，一些研究表明，在讲课方式学生不习惯的课堂上，他们精力特别集中，并且非常努力，做得很好。

我们每个人都对最佳学习方式有自己的观点，该观点已经在某种程度上渗入关于课堂的教育主流思想里，现在这种观点已牢固地存在于教学战略上。这在某种程度上类似于星座运势，几十年来，教师、父母甚至学生都已经接受了这个想法，即大家都有他们自己的独特的学习方式。作为回应，在过去几十年中，教育和教学理论家已经确定并制定了至少70种经过证明的学习方式。

然而，为学习方式量身定制课程的危险并不缺少经验证据的支持，它的危险是这样的课程框架是有限的且注意力分散的。教师们尝试让新的、挑战经验学习方式的设计课程适应空想的学习方式，这耗费了教师的时间，也稀释了教学资源。

我们当然要解释一下研究者是如何定义学习方式的：“学习方式”是一种观念，即不同的个体对什么指令或学习模式对他们来说是最有效的有不同的意见。赞成学习方式评价的人争论说，一个人最好的学习方式

是首先判断他独立的学习方式，然后制订相应的课程计划，我们也把这一过程称作“匹配”。

典型的学习方式评价是询问人们更喜欢什么样的信息表现形式，例如词语、图片或演讲。另外一个普遍的问题是对个人来说，最吸引人的或最合适的精神活动是什么形式（如分析或聆听）。假定设计和3D打印对拥有“视觉”或“触觉”学习方式的学生有很大吸引力，这具有很强的诱惑力。问题是这将遗漏有能力的学生，如果考试，这些有能力的学生将被划为不同的类别。

如果学习方式是可疑的科学，那么在K–12（从幼儿园到12年级）的教室里是否有理论基础支持3D打印和设计工具的价值？可能有。掌握坚实基础知识或者抽象概念的人能够在新环境中创造新的概念。用一个更加学术的方式来描述不同环境中的相同的知识，就是“多重表达”。

这里举一个例子：当你考虑“抛物线”这个术语时，出现在你的脑海里的会是什么？如果你真正理解抛物线的概念，你会立刻想起多项式方程，或者一条几何曲线、一个聚光镜，甚至可能是旋转液体的表面，这些多重表达（分析的、几何的、光学的、物理的）都与抛物线有关。一个真正掌握这个概念的人能够把它们联系起来，但如果你只想到了其中一个，说明你没有完全掌握这个概念。

把数字化设计转化为实际物理对象的最强大的方面是，加强抽象概念转化为不同的媒介。设计文件中所包含的知识是虚拟的，在数字媒体中被捕捉。知识经打印之后成为实物。设计工具和3D打印因作为工具挑战学生在新媒介中描绘概念或过程的能力而闪闪发光。

3D打印让学生不再遗忘

人们熟悉使用视觉媒介区分复杂抽象主题的价值。我们大多数人都很轻松地接受了这个概念，并认为从书本学习新知识的最好方法应用来解决实际的、现实世界的问题。3D打印作为一个有价值教育工具的原因在于，它给教学和学习抽象概念引入了附加的物理维度。

例如，Fab@school项目的“边做边学”课程，动能被定义为“一个系统或物体运动时所具有的能量，随着物理速度的增加和重量变大而增加”，这样的一种书面描述是定义动能的一种方法。当学生设计、制作风车，并且把它放在风扇前面接通了一个电子电路时，这给出了通过一种附加的媒介加强概念的方法。

当戴夫在地理课堂上通过3D打印引导学生时，学生在不同的媒介之间转换。首先，学生学习从数值上描写山体表面的知识（数值是描写火山形貌的一种媒介），一个数据库描写火山喷发之前的形貌，另外一个

描写火山喷发之后的形貌。接下来学生把原始地形测量资料转化为设计文件（数字是另外一个媒介）。最后，学生打印出圣海伦火山喷发之后的小型复制品（物理介质）。

我们或许从来都不知道，但我想知道10年以后学生是否还记得这个地理练习，以及他们将记住什么？如果一些学生仅从书本上重复阅读火山喷发，其他人则进行整个火山喷发的实验，我想知道哪个组将更好地记住课程内容。

这里有一个有趣的实验，可以测试多重表达的作用。首先写一个简单方程，例如$y=1/x$，写出的数学方程是描述数字之间关系的一种方式。第二个媒介是视觉的，在二维的图片上画出方程。

现在让我们设想一下，你带着这个简单的书写方程去商场，或者你的州议会，对于给出的x值，让一些成年人解出这个方程。或许一些人知道方程是干什么的，他们知道为了解出x，你必须给出y值（或相反）。在这种情况下，如果你告诉他们y值是2，他们能很容易地计算出x值是1/2。

如果同样的方程是在一个新的媒介中表达，将会怎么样？假设询问一个成功解出这个方程的人，让他在图上画出它的形状。如果你回到商场或者州议会，随便找个人这么做，可能很少有人能够轻易用图形表达出方程。我们大多数人没有记住高中或者大学里的数学技巧，其中的一个原因是，MBA（工商管理硕士）课程申请人中高级经理入学考试的GRE（美国研究生入学考试）数学分数线低于应届大学毕业生分数线。

一些教育理论家推测，我们大多数人离开学校之后很快就忘记数学课程的原因是，我们在单一的抽象介质中学习数学。如果学生学习抽象数学概念，然后把它转换为不同介质里的概念，可能他们能够更好地掌握和回忆这些概念。以我自身的经验来看，死记抽象概念让我通过了考试，但考试过后我很快就忘记了它们。

用单一的媒介讲解和学习抽象概念很容易，只需要记忆就可以，但真正要掌握它们，这是根本不行的。问题在于大多数的课堂教育只关注课本，而这对于大多数人的记忆是根本不够的。

参加Fab@school项目的学生记住动能书面定义的时间可能晚一些。事实上，幸运的少数人几年之后能够精确地背出动能的概念，但大多数学生能够记住动能可以驱动风力涡轮机的旋转叶片来接通电子电路。

触觉教学：课堂教育的新革命

数学方程能够描述一个简单的二维线，更复杂的方程描述三维对象。如果从书面方程出发，把模型转化为平面图片是一个挑战的话，想

象一下给学生讲解压力相互作用、体积和温度（热力学方程）将是多么大的挑战。

教师们将三维辅助教学称为“可操作的”，物理教学的可操作性支持“触觉教学”。触觉学习不是一种学习方式，而是一个重要的学习管道。

在触觉学习中，学生不是在黑板或显示器上简单地看一幅图形，而是通过他们的触觉感受抓住核心概念的三维模型，这样能够吸收和消化知识。对于有视觉障碍的学生，触觉学习是一个重要的学习途径。如果学生在设计文件中掌握了概念并打印一个物理可操作的模型，媒介转移将可能帮助他们加强对新的抽象知识的理解。

几年前，我收到一封来自华盛顿大学物理学院克林顿·迪皮尤教授的邮件。迪皮尤教授在大学里教授热力学。热力学主要学习封闭系统中压力、体积和温度之间的相互作用。例如，如果你使用过自行车打气筒，你会注意到随着你按压打气筒的把手，气筒变热了。当你压缩空气时，你增加了空气的压力，减少了它的体积，因此温度升高。在压力、体积和温度之间，存在一个正在进行的动力学三向相互作用。

大多数学生都能够在迪皮尤教授的课堂上看到P–V–T（压力–体积–温度）之间关系的图形。一个名叫戴夫·普莱斯曼的学生视力有问题，很难看到P–V–T之间复杂的空间关系。30年前，为了帮助他理解热力学的基本准则，迪皮尤教授动手做了一个其他学生在黑板上就能看到的代表P–V–T之间关系的泥塑模型。泥塑模型高约10厘米，底座宽15厘米。戴夫能够沿着压力增加的方向滑动手指，“感受”每个点的变化，在体积方向的表面向下滑，表示当压力增加时体积减小。



图9–6　触觉教学：由折叠的硬纸板制作，后发展为3D打印
图片来源：Glen Bull, University of Virginia

毕业30年后，戴夫还记得泥塑模型，他给迪皮尤教授发邮件询问泥塑模型是否还在。非常幸运，泥塑模型还在，泥塑模型的确经受住了时间的考验。迪皮尤教授已经从华盛顿大学退休，当他整理桌子的时候，他把原始的泥塑模型装起来邮寄到了我的实验室。戴夫和我都想知道，是否能够扫描原始的手工模型，把扫描结果载入设计文件，也让其他的物理教师能够使用。

泥塑模型邮寄到时已经碎了，精心地重新组合之后，我们成功地扫描并把它载入设计文件，该文件在网上供免费下载。今天任何接触3D打印机的人都能够重新制造一个迪皮尤教授独一无二的泥塑模型的复制品。我不知道是否每个人都曾经使用过这个模型，也不知道是否视力有障碍的学生都能从这个模型受益，但存在这样的机会。



图9–7　热力学PVT泥塑模型，原始模型（左）和3D打印的复制品（右）

我记得，在我父亲曾经工作的物理学院的过道塞满了老旧的、满是灰尘的晶体、钟摆、弹簧和扳手的教学模型，这些模型非常漂亮，显然是由热爱教学的人制作的。但仅靠爱好和天资还不能够获得他人使用的模型：一旦模型创造者退休了，模型也退休了。3D打印却能够使这些模型经久不衰。3D打印机能够轻松地分享和传播物理模型，增加创作它们的动机。

3D打印打开了创作可操作教学模型的可能性。按照用户要求设计的3D打印的可操作教学模型，使教师具有制作独一无二教学工具的能力，而这些在标准课程大纲里没有。教师能够分享和加强其他3D打印的可操作性，并在他们自己的课程计划上采用。

在小学里，操作教学能够给小学生解释简单概念。学生能够创造一个稀有昆虫的三维模型，或者考古遗迹的复制品。在更高年级的课堂上，操作教学能够帮助学生理解复杂的概念，比如分子模型或机械设备的零件。

课堂教育如何应用3D打印

今天，3D打印机已经在高中用来制作固体物件。如果高中已有3D设计软件和数控铣床，安装一台低成本的、消费性等级的3D打印机并不困难。在某种意义上，当3D打印机带着3D设计软件进入教室的时候，它应该是教室制作工具，能够把设计想法变为现实。

在中小学推广3D打印的第一道障碍是如何训练教师、如何制定好的课程、如何拟合3D设计并把它变为标准化的测试过程。教师应该有积极性，可以接受把设计软件和3D打印与核心的数学和科学课程想结合。学校董事会和父母需要理解他们自己在教学过程中的角色。在一定程度上，我们应该设计整合他们各自擅长的课程。

教师给教学带来蓬勃生机，并决定学生在整个学年采用何种教学活动。然而，许多小学教师并不能熟练地讲解数学和科学，他们仅仅把自己定位于阅读教师。

为了让教师熟悉3D打印课程，我们需要确保，打印课程不是让教师讲解设计和3D打印过程基础的机械知识。大家都有各自的利益，并非人人都对新工艺感兴趣。许多教师和学生只有看到在自己的创意舞台应用设计和3D打印技术或者在日常生活中解决问题时，他们才会因3D打印而兴奋不已。

如果公立学校准备投资3D打印机和相关课程，为了评价投资，课程方案需要配合国家和州的教育标准，以便教师能够投入这些教学活动中。20世纪80年代，美国大多数的州都批准了通过实施遍及全州的课程向导和框架来改善K–12教育质量的政策。大约一半的州都要求学生通过一些形式的考试才能够高中毕业。

私立学校由于不需要依附政府的标准而享有更高的自由度。然而在公立学校系统，教师和学校的生与死是由学生一年一度的标准化考试决定的。标准化考试是一把双刃剑。一方面能够把表现不佳的学校挑出来，或许通过给它们提供附加的基金资助或其他援助改善学校的教学质量。

另一方面，出乎意料的是，标准化计划想要改善公众的K–12教育质量，同样可能成为推广3D打印和设计课程的障碍。由于《有教无类法案》的出台，学校强调的是考试成绩，在已经很紧凑的课程里引入新的内容，对学校来说存在风险。

此外，在大多数K–12学校，核心教育对工程和设计没有要求，因此没有关于工程和设计的标准化考试。为了引入设计和打印技术，教师必须找到一条出路，以应用它们支持州的标准。挑战在于如何把模糊和概念化的标准转化为轻快的、有趣的相关课程计划。

一些州设置了遍及全州的课程，并且批准了全州通用的教材。然而课程教材的制定和使用往往是当地学区或学校的责任。但州标准也有好的一面，标准倾向比较含糊，给教师留出了空间讲授他们认为最好的内容。

以前几乎没有正式的关于将3D打印和其他桌面制作系统融入教室教

学最好方法的研究。测试新课程不是一个简单的流程。美国教育部要求公立学校的教师参加“证据驱动课程设计”。



图9–8

注：MakerBot资助K–12学校的教师建立了创新课程计划。在纽约布鲁克林的二年级教室里，学生通过设计房子，并把房子放在被冲走的沙滩“河岸”来学习腐蚀。

图片来源：Ryan Cain

受美国食品和药物管理局（FDA）评价新药品效果的启发，新的教学方法或者课程必须得到相关数据的支持，这些数据来源于随机课堂实验。教师和研究者不能仅凭他们的感觉使用一些新的教学方法。实验首先需要比较学生在新的教学方法中的表现和在目前标准方法（基线）中的表现。新的教学方法要想合格，必须在统计上证明其显著改善了学生的短期和长期表现。

“证据驱动课程设计”的挑战是，它很难在教室里进行公正的随机实验。这需要时间，而且参加的每个人，包括教师、学生和他们的父母，往往都知道学生在哪个组。如果参加者对特殊方法抱有偏见，他们的行为可能受到影响，并且他们会不愿意接受他们不赞成的教学方法。可能有些学校已经开展实验测试设计和3D打印对学生学习的影响，但这仍是一个漫长的过程。

3D打印未来的课堂

3D打印能否改变课堂？是的。课堂课程将发生突然的、剧烈的变革吗？不。像任何新技术一样，3D打印将逐渐进入课堂，逐渐被一些学校和学科领域所接受，同样也将被一些学校忽视。

中小学面临的困难更多。大多数中小学没有开设设计和工程课程。为了使设计和3D打印成为公共课堂的主流，教师某种程度上必须依附一些技术支持学生获取传统的核心知识，结果，介绍3D打印将变成测试教师创新程度的一个工具。

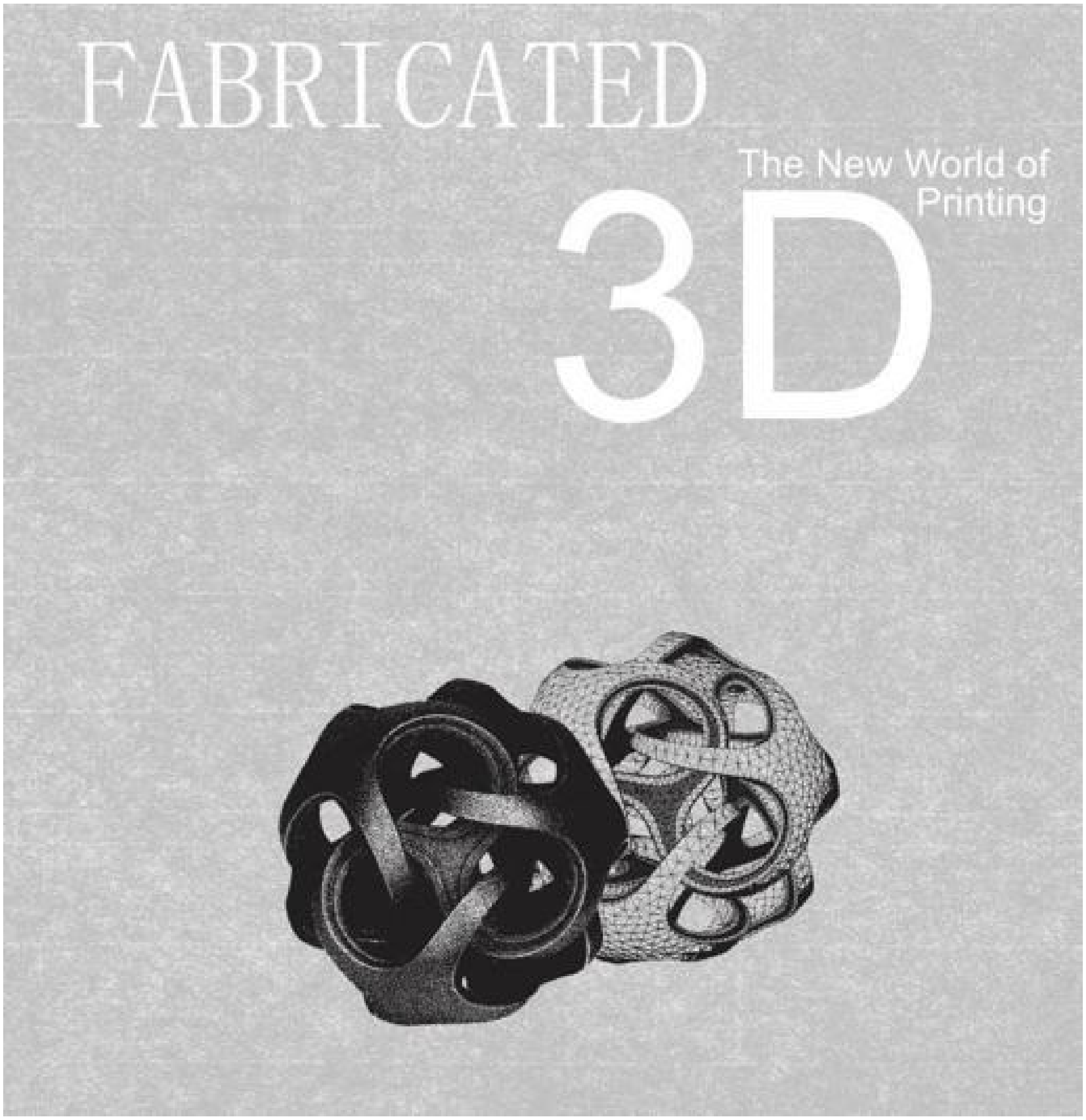
这里我们应该注意到，一些富有想象力和具有创新性的3D打印应用已经开始在大专院校的课程里推广。对大学教授来说，很容易在他们的课堂上试验3D打印。但K–12课堂的课程计划则不太容易改变，并且公立学校的教师也不太容易得到基金资助来支持3D打印技术的使用。

如果设计工具和3D打印按照计算机教育的已有模式发展，那将是令人遗憾的。富裕的K–12学校和大学装备了快速的网络，也配备了掌握最新科技的教师。相比之下，资源匮乏的学区则很艰难，学生只能按照预定的时间在仅有的计算机教室（计算机教室经常被锁上）里使用落伍的计算机。K–12学校的毕业生数量比其他任何教育途径都多。我们相信3D打印能够传授学生所有的学习能力，并使他们具备一定的社会经济背景。

回顾计算机影响教育的方式，这种方式很容易与其他方式进行对比。计算机最初的应用仅仅是为了提高那些被认为与“计算机相关”的课堂，例如编程课，或者可能是数学课。但这种情况已经发生了变化，今天每个教室都在使用计算机，每个课堂（从历史课到艺术课）也在使用计算机。最重要的是，计算机已经打开了教授和学习科学的全新方法的大门，并且这种改变结束的可能性遥遥无期。

3D打印机有可能延续同样的道路。最初，3D打印机会被相关的课堂所采用，例如技术学院的课堂。很快，3D打印机会被另外的课堂所采用，从数学课到生物课，最终到艺术课、历史课和文学课。和计算机一样，3D打印机将打开教授和学习科学的全新方法的大门，我们今天还无法想象这种教授和学习的方法。

第10章　美好的世界：3D打印时代的审美标准



我的邻居是家居用品设计师，我去他家吃饭时，他总会向我展示他最新、最畅销的作品。有一天晚上，他让我看了一个波浪形的灯罩，还有一次他递给我一个交叉相扣的盐和胡椒粉的调味瓶。不论他设计什么，一旦他开始了这一晚上的展示和陈述，我们的谈话就展开了。

我的邻居喜欢告诉他的晚餐客人们，设计的过程是充满乐趣的，但是仅仅开始阶段有趣。他会说，可以将专业人士和业余爱好者区分开的真正挑战就是如何将一个设计制造出来。从设计原型到批量生产的飞跃不亚于跨越一个大峡谷。

我的邻居会解释说，一个好的设计师必须确保其设计理念实际上是

可以在工厂里生产制作的。同时他还得是一个销售人员，可以说服制造商相信他的设计可以赚钱，而且赚的钱足以负担制造商建立一条工厂生产线过程中的大量投资。

我有一阵子没见我的邻居，但我迫不及待地想告诉他，他的黑暗日子已经结束了。3D打印机就是众多设计师和艺术家一直苦苦等待的输出设备。复杂和独特的形状也许是制造工程师们担心的问题，但对艺术家、时装设计师、珠宝制造商以及建筑师来说，复杂的模型和新颖的几何形状代表着未知的新机遇。

建筑师、工业设计师和艺术家迫切地希望赶快开发利用这一大批新的可供设计的宝藏。3D打印消除了很多才华横溢的设计师在实现他们想法的过程中遇到的资源和技术限制。3D打印和设计技术实现了他们第一次向小批量生产的商业领域的进军，例如珠宝制作、高档家居装饰以及实验性的时装设计。

计算机：如同大自然造物者

自然界中发现的很多物体在测量时都具有规则的尺寸，可根据数学方程绘制。你见过切成两半的贝壳吗？贝壳的螺旋线是被称为“斐波那契数列”的古老数学概念的自然体现，无论外壳的大小是像乒乓球还是像大西瓜，其内部的螺旋曲线往往具有相同的形状。

斐波那契数列在自然界中随处可见。树枝就按照这个顺序分叉生长，蕨类植物和洋蓟花的形状，甚至漩涡和海带波动的模式都是如此。

斐波那契数列以规律的方式展开。每个数字都是前两个的总和，以简单的规则可以生成序列，所以数列的顺序是1、1、2、3、5、8、13、21……计算机被指定这一规则后，就可以轻松地计算斐波那契数的长数列。

随着计算能力的增强，研究人员发现模仿大自然设计智慧的最有效的办法之一，就是运用数学规律或算法生成形状。计算机生成的三维分形艺术已经存在了几十年，但是直到最近仍只存在于虚拟世界中。唯一改变的就是3D打印技术将实现把复杂抽象的模型从虚拟世界拉入现实世界这一构想。在3D打印技术诞生之前，贝壳的螺旋内腔室只能自然形成。

设计师们多年来都使用常规软件进行设计。有机设计作为一种新模式方兴未艾，终于出现了一种输出设备可以将这些概念变为现实。随着3D打印将数学模型和自然规律从抽象的束缚中解放出来，各种以前无法实现的设计正逐步呈现。

由算法或公式产生的图形通过人为的方式产生多种变化。利用数据

和算法的结合，设计师们可以创造出多种二维和三维的形状和图案。一些算法可以生成分支结构，一些可以生成曲面形状，如大量肥皂泡，还有一些可以生成随机的角刺，如石英晶体。

大自然的制造过程是重复的。所有的生物（从一株植物到人类胚胎）通常都是从一个简单的生殖细胞或种子开始，遵从一套相对较小的发展“规律”重复进行。像不断对一个数学公式进行赋值一样，种子发育的形状、形式和模式受周围环境或有限的可利用资源中的诱因驱动。在一个较小的范围内，汽车挡风玻璃上的一片冰晶体是从籽晶开始根据固定的重复模式生长和扩散的。

咖啡桌也可以成长。Fractal–T（T型碎片）就是由设计师赫尔诺特·奥伯费尔、简·沃特尔和马蒂亚斯·贝尔设计的一个3D打印的咖啡桌。设计师们评价这一惊人的3D打印作品为：“其外观加强了自然和数学公式之间逐步增强的联系。”Fractal–T外形的灵感来源于树枝规则的生长结构和模式。咖啡桌使用立体平版印刷和半透明树脂塑料制作，是一件完整的3D打印作品，没有接缝或接头。它的设计者指出“使用其他制作方法完全不可能做出Fractal–T”。



图10–1　基于模拟树枝结构和生长算法制作的咖啡桌

图片来源：MGX, a division of Materialise. Designed by Gernot Oberfell, Jan Wertel, and Matthias Bär.

Fractal–T是一件几何模型的杰作。树状茎交织在一起，变成越来越小的分支，直到桌面。它的半透明桌体是怀旧的硬化树液。Fractal–T已经在伦敦的维多利亚和艾伯特博物馆、纽约的大都会艺术博物馆和巴塞罗那的设计中心等几个精英艺术博物馆展出。

如果你浏览Shapeways网站，就会发现3D打印珠宝是目前市场上最

受欢迎的业务之一。珠宝相对较小，任务相对比较简单，也就是说，完全没有必要像3D打印航空器零件那么小心谨慎。因此，珠宝也就成为最受欢迎的设计和打印对象。

芭谢芭·格罗斯曼是3D打印领域最著名和最早的设计者之一。芭谢芭主要设计雕塑、珠宝和家居用品，其几何外观代表了数学和物理学的著名定律。芭谢芭的设计拥有一个共同的主题：数学。



图10–2　芭谢芭设计的3D打印作品开瓶器的灵感来源于被称为“克莱因瓶”的数学概念

图片来源：Bathsheba Grossman

芭谢芭在她的网站上这样写道:“我是一个探索艺术和数学交叉领域的艺术家。”她的代表作之一就是将著名的数学算法博罗梅安环设计成型，该设计为一款项链吊坠，由边缘不相碰的三连环做成。像博罗梅安环这样的项链吊坠一样，格罗斯曼的大多数作品都具有错综复杂和不断重复的内部几何结构，只能由3D打印机制造出来。传统的珠宝制作方法，如蜡模或焊接，都不能制造出这种连续不断的中空内腔。

设计师于内勒努（Unellenu）专攻设计可3D打印的不规则雕塑和珠

宝，其各项设计的价格均接近于大多数消费者最高100美元的心理价位。于内勒努在Shapeways网站上的店铺提供多种选择，包括不同金属制作的树枝挂件，每一种代表一个数学模型。毕达哥拉斯树是一件珠宝首饰架，它的算法设计来源于锥尖，三角形的分支用来悬挂项链、耳环和其他首饰。

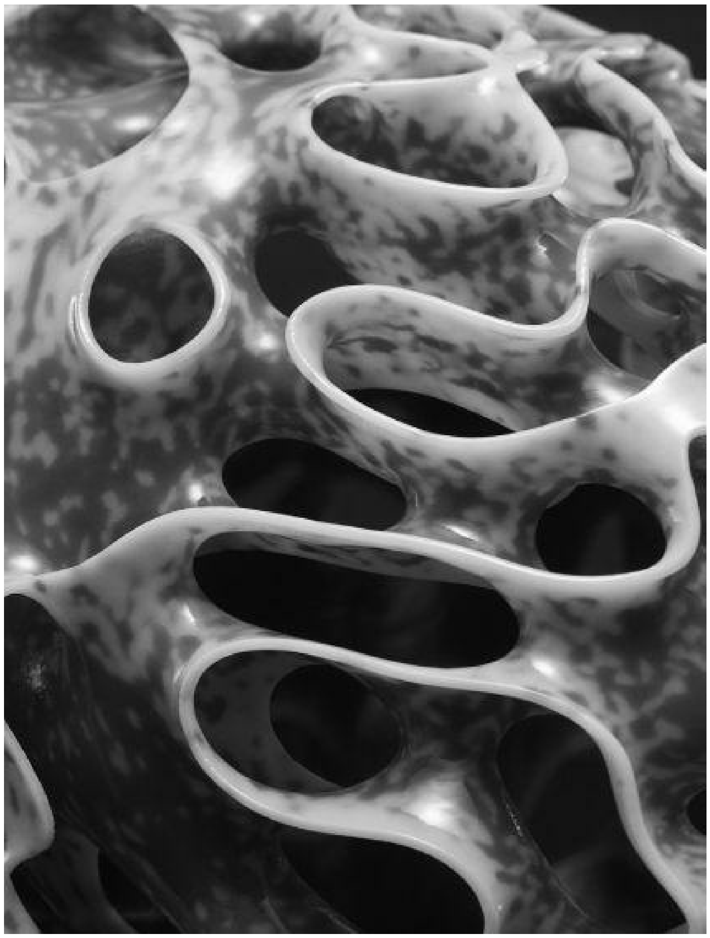


图10–3

注：麻省理工学院教授内里·奥克斯纳姆是生成设计领域知名专家之一。她利用3D打印技术制作由数学算法设计的图形，如玻璃、钢材和木材，而这类图形基本不能采用传统材料制作。

图片来源：Neri Oxman, W.Carter (MIT), Joe Hicklin (The Mathworks), Centre Pompidou, Paris, France, Photo: Yoram Reshef

神经系统公司是一家由美国麻省理工学院毕业生杰西卡·罗森克兰茨和杰西·路易斯–罗森博格于2007年成立的生成设计公司，主要设计基于数学模型的3D打印家居用品和珠宝。他们的产品风格以藻类、珊瑚、细胞和脉络的闪亮再现为主，其灵感来源于自然规律。神经系统公司在一个与消费者互动的程序软件上共享他们的数学系统，消费者可以利用

这一系统设计他们自己独一无二的产品。

乔希·哈克是一位独立的艺术家和设计师，他认为自己是一位经过传统训练的艺术家和雕塑家，可以以人性的方式使用比特、二进制1和0表达自己，创作新颖的作品。我偶然在众筹网站Kickstarter上发现乔希为一件名叫“颅骨解剖”的雕塑项目的筹集资金记录。该作品是一件白色的雕塑，它的塑料头颅装饰是3D打印的。我们通话时，我得知他成长在伊利诺伊州的密西西比河流域，他将他放荡不羁的童年描述为集“‘60’后没有网络的社区生活、天使面孔魔鬼心灵的保姆、完整的艺术洗礼以及家庭悲剧”为一体的生活。如今他是一名全职的艺术家和领先的数字雕塑家。乔希解释说：“我所做的绝大部分是数字工作。”

几年前，当他开办和经营一家精品设计公司时，乔希就学会了使用设计软件和3D打印机。他说：“我不知道一个设计师在不知道工具使用方法的情况下，如何依然待在这个领域。”在这个行业摸爬滚打了几年之后，他始终难以抵挡想返回艺术和雕塑领域的召唤。2008年，乔希开始将他的所有激情都投入数字雕刻和3D打印。

乔希开始用3D打印技术制作他在计算机上设计的精巧复杂的几何图形。他说：“我习惯于在计算机上创作几何图形，但是它们太复杂了，几乎制作不出来，这些年我所画的设计图都过于复杂，难以雕刻，黏土、木头、石头，没有一样可以成功。”

乔希的很多雕塑作品都反映了他的传统训练—裸体和人物的研究，他的很多作品也都是数字化设计的3D打印。他的“结和纠缠”（Knots & Tangles）系列反映了他对自然形成的形状，如树根、藤蔓、神经网络或心血管系统等的热爱及他的设计潜力。

“我很庆幸，我经历了这些改变。这对艺术家来说是一次彻底的变革。”他有些动情地补充道，“这种有机的复杂模型从来没有开发和制造出来，我很期待未来的发展。”

无机的物理过程同样也可以产生图形。来自特拉维夫的埃亚尔·吉佛（Eyal Gever）创造了他称为“灾难艺术”的作品。他采用仿真算法，重建了眨眼就会消失的瞬间悲惨时刻。他集中全力，利用3D打印机使这些时刻成为现实，例如他成功展现了车祸或溢油的瞬间，这些在现实世界里均是冻结的时间效果。



图10–4　油的瀑布

注：油的流动模拟被用来计算几何图形，然后将其“冻结”制作一个打印的模型（小图）

图片来源：Eyal Gever © 2012 All Rights Reserved www.eyalgever.com

3D打印：让你脚上的鞋子舒适无比

生成设计最有效的应用之一就是将计算机算法应用于某一特定问题，从而找到最佳解决方案。通过快速的迭代处理和对所有可能性的测试，计算机可以生成设计规格，当进行3D打印时，可以创造一件适应某一特定对象或环境的最佳产品。时装设计就是一个可以利用优化的3D打印技术、有机设计的成熟领域。我们参观了伦敦时装学院，以更多地了解有关3D打印时装鞋的知识。

当菲利普·德拉莫尔和几个学生走进来介绍自己，并将两只鞋摆在会议桌上的时候，我们与时装学院师生下午的会谈就开始了。菲利普解释说，这两只3D打印鞋都是硕士生设计项目的成果。两只鞋都是3D打印的，是时装学院和伦敦一家名为Within　Technologies的软件设计公司的合作成果。

菲利普负责的学院时尚数码工作室是时装学院的学生接触先进技术进行实践的地方，如全身扫描室以及最近的3D打印技术。菲利普说：“时装设计产业越来越关注时尚的功能性。”

撇开舒适性不谈，鞋的款式与我之前见过的任何一款鞋均不相同。我不是一个天马行空、想象力超常的时尚潮人，但这些鞋是完全不同的，背离了传承千年的传统设计。一只鞋是黑色的，充满了短刺，像一只豪猪的背部或者更像一张钉床。设计师罗斯·巴伯告诉我们，几周前，这些鞋曾经出现在那些大摇大摆地走猫步的男模脚上。

罗斯告诉我们，他的鞋之所以与众不同，不是因为它们的外观，而是工业设计造就了它们。帮助设计鞋子的软件公司Within Technologies开发了基于自然的设计解决方案。举例来说，Within Technologies最近的项目中包括一个优化金属发动机缸体热交换项目，公司的工程师研究了鱼鳃中水的流动，从而发明出一种非常有效的发动机缸体，它的内部几何结构就是波浪形和腮状的。



图10–5

注：由伦敦时装学院的罗斯·巴伯设计的3D打印鞋，由Within Technologies公司优化。里面的皮鞋手工缝制进去，以确保男模走秀时穿着的舒适度。

图片来源：Ross Barber

罗斯向我们指出，他的3D打印鞋并没有使用任何胶水黏合。它们采用通常应用于制造工业零部件的超耐用聚合材料，作为一个整体打印出来。为了改善鞋子的舒适度，罗斯手工缝制了一只从男鞋店中购买的皮靴面。结果就成了眼前这只罩有标准鞋面、蕾丝和鞋舌，并嵌套在一个3D打印的鞋壳内的混搭鞋。

菲利普把鞋放在桌子上。我拿起来，惊叹它竟如此轻盈。尽管鞋子主要追求吸引时尚界的关注，但这也是一件不可思议的应用，它结实耐用，采用工程级别的高分子聚合物制成，而且结合了Within Technologies公司复杂烦琐的计算机算法。

Within Technologies公司的技术总监安东尼·鲁托也于当天下午参观了伦敦时装学院。安东尼解释道，他和罗斯改写了一种设计算法，该算

法通常被Within　Technologies公司设计者用来制作定制的医疗整形植入物，如人造髋关节。为了满足设计一只鞋的挑战，重量上要轻，而且要结实耐用，安东尼和罗斯调整了医疗整形算法，从而达到优化鞋底结构和外形的目的。

经过几个月的辛苦工作、实验和纠错，安东尼和罗斯设计并打印出外观靓丽、轻巧、舒适耐用的鞋子。安东尼向我们演示了该鞋底的设计生成过程：鞋底制成了类似格子框架的结构，而这种格子结构的定制设计使鞋子减轻了重量，但又比工业用的橡胶鞋底耐用。

大多数人听到“格子”这个词都会想到一个玫瑰花园或是开满鲜花的绿色藤蔓，向上缠绕在一排白色网格结构的栅栏上，那是一种二维的格子。二维格子采用传统的生产工艺是很容易制造出来的，但3D打印技术出现在设计舞台前，三维格子是无法制作的。

格子是一种拥有广泛应用范围的基本工程结构，类似于可以用来制作出精美糕点的生面团。格子结构是生成设计的经典案例，是由计算机算法自动生成定期重复的、半定期重复的或者随机重复的结构。一些三维格子结构内部是带角的重复几何形状，如三维三角形，而其余的则看起来像是纤维的随机纠缠。

当罗斯完成他的陈述后，我们转向了摆放第二只鞋的桌子。这只鞋同样也是3D打印的，是一只女士的露趾凉鞋，白色楔形高跟，亮桃红色鞋面。设计这只鞋的学生名叫宋坤（Hoon Chung），其导师同样也是菲利普。宋坤解释说他采用了不同的设计方案，较少关注内部结构和鞋子的耐用性，更多关注它的市场吸引力和制作过程。



图10–6　由宋坤设计的3D打印鞋模

图片来源：Hoon Chung

像大多数设计师一样，宋坤喜欢3D打印他的设计理念，因为这样他可以更好地控制制作过程。本学期初，宋坤首先考虑的是注塑鞋。他访问了西班牙的鞋厂，并看到了胶水和工厂使用的其他化学产品对环境造成的危害。

宋坤进而说到3D打印，他发现增加添加剂的制作过程使他能够利用模块化组件制造鞋子。鞋子的部件可以互换，所以穿鞋人能够“啪”地解开鞋跟，然后换上其他颜色的鞋跟，这样脚上的鞋就焕然一新了。模块以及替换零部件也不需要用胶水黏合，方便环保。



图10–7　下一代沙滩装

注：图中为无尽时尚设计工作室（Continuum Fashion）的詹娜·费瑟和黄玛丽设计的3D打印比基尼。

图片来源：Jenna Fizel and Mary Huang, Continuum Fashion

获取生物数据：打印最优化产品

大部分西方的设计历史记录都把自然和科技看成极性。自然之力是随性且不可预知的，是一种被驯服的力；设计就是从自然的混沌中进行创作的过程，将人类理性的标记印刻到原材料上。想想装饰华丽的巴洛克家具风格或是在俄罗斯东正教教堂发现的令人震惊的精雕细琢的镀金塑像。

是的，几十年前，现代建筑就包含有机和自然启发的形状。然而，并不是每一个人都同意建筑师应扮演的创意角色，将引导和协调基于生物算法的应用当成一个设计问题。这就是生成设计之所以引起争议和破裂的原因。

如果生成设计是使用数学法则和约束的循环从而形成3D外形和模式的过程，那么到底是计算机还是人在做设计？有一些人也许会辩解说，因为生成设计的结果是数学模型循环的产品，所以它实际上就不是设计过程了。计算机只是盲目地按照它自己的程序运行公式和数据。但是，设计这些运算规则的正是这些艺术家们。

进化的过程“设计”了贝壳的形状，使其能够在残酷的海洋环境中生存下来，这一过程持续了数百万年，涉及数十亿次的设计循环（或产生

新一代）。设计师通过计算机的计算能力、数据和3D打印技术来呈现这一进化过程。设计师能够使一套设计规则自动运行并监测由此产生的形状，使其展开成为一个模式。同时，设计师还能够应用相同的规律多次重复设计过程。设计师还可以改变设计规则，选择那些能够生成更好外观或是更有趣图形的设计规则。新技术的发展使设计师、艺术家和建筑师的水平和设计理念均获得提升。

珍妮·萨宾是康奈尔大学建筑系的教授，同时也是一名具有开创精神的建筑设计师。她的研究涉及生物系统、计算过程以及材料结构设计三者的交叉融合。我们采访了珍妮，从而了解到更多关于生成设计过程和体系结构的知识。“近年来，建筑设计过程从构图设计转变为生成设计。”她解释道，“写作和黑客软件已成为设计过程的一部分。”

珍妮毕业于宾夕法尼亚大学，获得建筑硕士学位，她在那里学习了6年。当她攻读学位时，她发现自己深深陷入一个不可预测的尚未开发的创作领域，那就是基于计算机的生成设计和3D打印技术。珍妮说：“生成设计最令人兴奋的一个特点就是不到最后你永远不知道结果将是什么。”

她目前的合作研究项目之一—埃斯金（eSkin），就是使用蜂窝数据来为设计师所使用的建材提供灵感的。她和她的团队使用3D打印技术探索和捕捉基于组件的生成模型中的生物行为。我们请珍妮教授来帮助我们了解在下一代建筑材料打印中受生物学启发的生成设计究竟起了什么作用。

“对于埃斯金项目，大量的研究工作都专注于理解建筑物在与周围环境互动和相互适应的过程中如何变得更具有生物性。”她说道。埃斯金项目的科学家们获得了大量数据，这些数据是通过团队中的材料科学家设计的工程基质上所附的人体细胞获得的；然后团队中的建筑师尝试“逆转”所观察到的行为—他们设计了算法来模拟所观察到的细胞行为和生长过程，之后团队采用这些算法来生成可大范围应用的新设计方案。

埃斯金研究项目的研究理念就是细胞行为可以帮助人们设计出更节能的建筑材料，这些材料能够模仿细胞适应变化的环境条件。在一封邮件中，她是这样解释的：

细胞知道如何回应并适应环境的变化。我们将捕捉它们的动作，然后数字化，并最终使用3D打印机将结果输出。3D打印机使我们可以通过实时限制材料和制作过程来探索生物的行为和过程。现在我们不太把3D打印机视为一个具有代表性的设备，而是通过使用可替换零部件来探索部分和整体的关系。

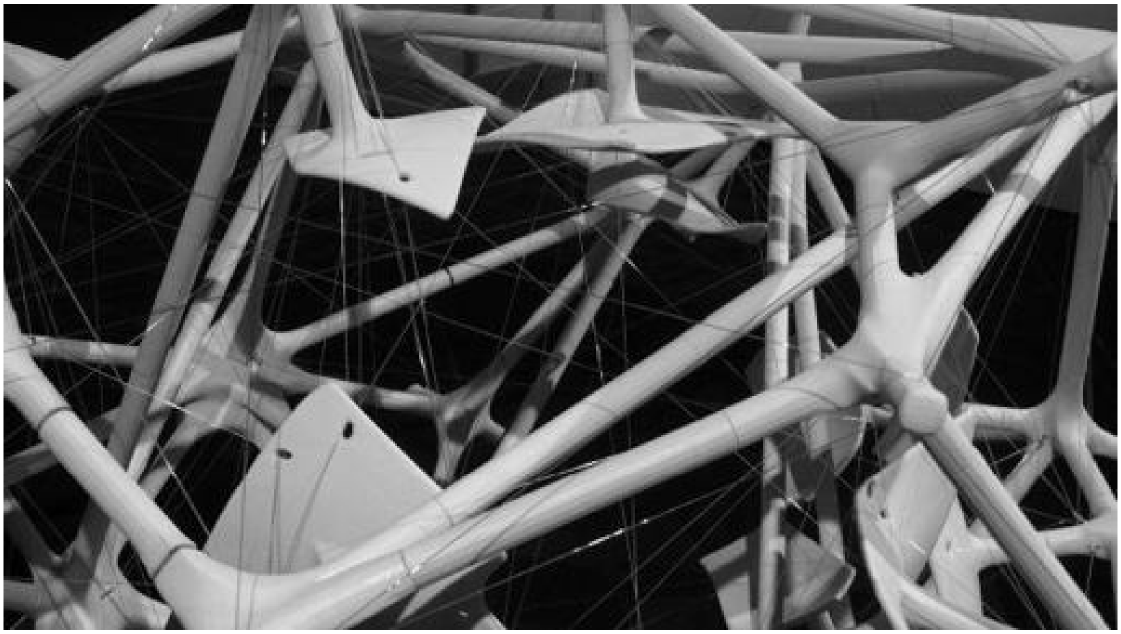


图10–8　受细胞结构启发的3D打印产品
图片来源：Jenny Sabin

埃斯金研究项目属于仿生学的族群研究方法。美国自然科学作家雅妮·班娜斯认为仿生学是“学习并模仿生命设计的过程，它的创新来自于大自然的灵感”。计算机生成设计和3D打印令人兴奋的地方就在于，最终我们希望能够3D打印的形状是根据周围环境或应用最优化后的物体。

随着技术的进步，我们继续从大自然中寻找灵感。自然界的设计代表着一种能够应对现实世界挑战的、优雅的、经得起时间检验的解决方案。2010年，建筑设计师迈克尔·珀林在TED大会的演讲中提道：“可以把大自然看作是一个产品的目录，而一切都得益于一项每年投入38亿美元的研究及其发展。”

响应智能设计

在伦敦市中心的另一所建筑学院里，学生3D打印出了蜂窝结构和未来派圆顶形建筑原型。我在伦敦访问期间顺便走访了建筑联盟学院。学院与几座宏大的灰白色联排式石质住宅融为一体，距离特拉法尔加广场只有几个街区的距离。后来我得知学校在很多年前，即在伦敦房价涨成天文数字之前，就购买了这些联排住宅。学校在街区上曾经存在过的唯一线索就是悬挂在一座灰白色的石头房子上的一个不显眼的横幅。

我早已经通过电子邮件向学院的数字化样机教授杰伦·范阿美嘉德做了自我介绍，并约好对其进行采访。我到学校的那天，长长的走廊从学校的前门延伸到了热闹喧哗的接待区，众多热切的学生们正上交他们用

牛皮纸包裹好的设计作品。

杰伦·范阿美嘉德是学院里3D设计与3D打印领域的专家。相互寒暄之后，他带我从接待区下楼梯来到了数字化样机区，它就隐藏在学校后面一片连续的、如同洞穴般的地下室。桌上摆放着几架小巧的制造机器，抽象的3D打印雕塑品悬挂在天花板上，地面上堆满了奇形怪状的3D打印设计试验作品。

数字化样机区的房间布置并不是以教学为导向的。杰伦告诉我说，这些房间在20世纪70年代用来举办平克·弗洛伊德的演唱会。而在那之前，大概20纪50年代，建筑系学生就在现在这些打印机摆放的地方举办了摇摆舞会。

杰伦5年前受聘来到学校教授数字化样机和设计。“我一来到这，就对这里非常感兴趣。”杰伦说，“学生们对集群计算机设计类的课程具有浓厚的兴趣和需求，而作为一个关键的设计工具，3D打印机也就理所当然地被认为是计算机设计的延伸。”

建筑史上有两个主要的思想流派：一种认为建筑设计是一门艺术，而另一种认为建筑设计更多地结合了工程制造的分析过程。杰伦说：“计算机辅助设计课程已经教了很多年，但其中创新的一点就是在实际设计过程中，我们可以应用计算机算法来帮助我们设计和创造出新颖的结构。”

“我刚来这所学校两三年的时候，数字化样机的理念就渗透到了每一门课程中。”杰伦说，“人们认识到设计软件和3D打印机并不仅仅是一门孤立的课程。相反，它们是另外一种工具，用来辅助所有可能利用它们来教授的其他课程。”

“计算机可以加强建筑设计的过程，我称它为3D思维。”杰伦说，“现在我们正开始应用这项技术捕捉物体形状最复杂的部分—数据，然后我们就可以编译算法，使其成为设计对象里不可分割的组成部分。”

“设计项目中最令人兴奋的事情就是拿到数据的时候。”杰伦巧妙地总结了数据在设计过程中所起到的越来越重要的新作用。不断增多的数据成为基于算法的智能设计和3D打印的原材料。来自各个渠道的数据被应用到建筑过程中，近期激光扫描已经成为建筑设计过程中的标准部分，传感器则成为另一个可以提供丰富信息的来源。

杰伦解释到，他的课程的长期愿景（愿景的实现依赖于一到两个学期的课程）就是设计一个响应型3D打印机。他设想了一种建筑物的3D打印机，可以直接拉到现场打印房屋和其他建筑物。这种响应型打印机可以对传感器传来的数据实时响应。智能设计软件快速翻译传感器传来的数据，进而引导打印机在特定的环境下制造出根据外部条件优化的结

构。

一个响应型3D打印机将不断更新设计命令，并相应地调整它的打印过程。未来响应型设计软件将会不断调整所打印结构的建筑形状。智能设计软件能够调整建筑结构的空间形状，从而使建筑结构更稳定。除了能够引导外形变化，响应型的智能设计软件也能够引导3D打印机所用的材料或者组合材料发生变化。

这种打印机运作起来会是什么样呢？杰伦在他的笔记本电脑上给我展示了一段概念视频。在屏幕上，一个大的打印头被一层层地放置，从而创造出一个带有波浪形墙壁和尖顶的蜂巢状圆屋顶。视频展示的这个特殊结构的设计理念部分来自于带有通风井的墙。

杰伦说："设计过程将包括智能化的部分，设计软件越来越复杂化，由自然环境决定的3D打印结构也会成为可能。"换一种方法来思考，也就是设计软件将作为一个动态响应电子蓝图，在一个封闭的反馈回路里，对3D打印机进行"传话"。

我得知杰伦正在学校指导一个学生科研项目，试图发明一个能够打印几米大小结构的3D打印机。由于这种打印机市面上买不到，杰伦和他的学生正在拆卸一个大型的数控机床，并装配上一个3D打印头。他们摆弄这台机器，希望可以发明一个能够自由起伏摆动的打印头。

响应型3D打印技术很有可能在5~10年内成为现实，杰伦告诉我说。我质疑说，发明一个大型打印机的本身结构相对而言就已经是这一项目的一部分了，而发明能够现场响应并做出最优决定的智能设计软件将花费更长时间。

不同于建筑起重机将钢筋投放到指定位置的方式，一个3D打印的结构是由能适应压力和负荷的建筑材料的定制混合而成的。就像一块不断生长的骨头，当在上面放置重物时，就会变厚，而3D打印的响应型桥梁就能够随着模拟压力的增加而增厚。

Fabbaloo博客（一个关注3D打印的博客网站）里一篇文章谈到个人制造和3D打印的问题时，是这样描述的："想象一下，建筑用的大梁在需要坚固的地方坚固，在需要轻巧的地方轻巧—或者在稀疏的部分不用任何材料。造出的每一块都能够根据它的特有目的，应用最少的材料，提供最好的物理强度。"

在理想的状态下，3D打印的结构能够采用本地可用资源制成，例如沙子或泥土。智能设计软件能够将材料混合，其本身就是一种复杂的艺术。而响应型3D打印技术要想变成现实，就需要更好的建筑材料、更有效的计算建模能力以及更强的变速数据分析能力，从而实时地响应设计的变化。

响应型打印机能够应对各种现实挑战。它们能够为流动人口所用，如难民或自然灾害的受害者，帮助他们建造避难场所。在普通情况下，作为建筑材料的一种改善，响应型打印机能够建造出生态友好型高密度舒适住宅。响应型、智能型和现场型的施工将对未来军事和太空探索大有益处。

便携式响应型打印机能够建造低成本住宅。根据《科技》（*Txchnologist*）杂志摩根·佩克的数据，在美国建一座2 800平方英尺[(1)]的标准两层楼房需要花费6周到6个月的时间，成本的一大部分来自于原材料，另外一块成本及困难源自施工过程和施工人员成本。

3D打印技术和计算机让我们可以从自然系统中汲取养分，并将数学模型应用到设计过程中。设计师休·都百利总结道：“设计不再只关心物体本身，渐渐变成关心系统，而现在是系统的系统，或者说生态系统。从某种意义上说，这些系统都是活的，它们不断成长，共同进化。”

用3D打印机打印建筑物

3D打印的结构已经出现。如今专家们正在使用传统的设计软件和定制的3D打印机打印水泥房子。像它们小尺寸的兄弟一样，建筑物的3D打印机能够制成迄今为止没办法制成的形状，如改善通气的渠道，特别的建筑特征以及千奇百怪的花样装饰。

南加州大学的教授比洛克·霍什内维斯正在打印建筑物。几年前，他和他的学生开始将实验黏土作为打印材料。现在，他早期的研究取得了进步。他可以使用名为轮廓工艺的建筑机器人，建造出大型混凝土建筑。

建筑机器人的工作原理跟普通大众使用的“喷嘴”3D打印机基本类似，都通过一个喷嘴打印头来挤压原材料。机器人通过喷射水泥浆来勾画出建筑结构的轮廓，然后使用纤维材料进行加固。随着打印头的不断移动，底层逐渐变硬，从而难以支撑不断增加的墙壁的重量。

目前，轮廓工艺机器人能够建造高7英尺[(2)]、长23英尺、宽15英尺的建筑结构。比洛克估计他的打印机可以20秒内建造1平方英尺的墙。轮廓工艺几秒内就可以铺设厚的水泥浆流，它拥有两个旋转铲子，随着水泥浆的注入，旋转铲子不断磨平每层水泥。



图10–9　轮廓工艺从喷嘴中喷射纤维增加水泥强度

图片来源：Behrokh Khoshnevis Center for Rabid Automated Fabrication Technologies(CRAFT) at the University of Southern California

现在，轮廓工艺技术尚不能将关键的基础设施嵌入到它的水泥毛坯中，如管道和电线。但相信总有一天，将会加入更复杂的建筑工具来帮助建筑机器人打印，例如新加一个“管道安装工”，机器人就能够将管道铺进逐渐变硬的水泥中。

科幻小说家布鲁斯·斯特林有一句名言：“就像白蚁在地球上建造城堡一样，机器人也可以在月球上建立起摩天大楼。”因为有太空旅行的想法，美国国家航空航天局资助了几个比洛克的建筑研究项目以探索在外太空建造建筑物的可能办法。比洛克预想某一天能够在月球和火星上盖房子，或者在地球上提供紧急的低成本住房。

在大西洋的另一边，意大利比萨斜塔的外面，意大利设计师和建筑师恩里科·迪尼设计了一个计算机引导的3D打印施工方法，使用沙子和一种无机黏合剂来建造人造砂岩。沙子是全球最常用的建筑材料之一。恩里科描述他的打印作品就像大理石一样光滑，冰凉，坚硬。他把他的建筑打印机命名为“D型自动化建造系统”。连接到D型打印机上的计算机运行计算机辅助设计软件，可以引导自动化手臂在一片沙床上一点点移动。

D型打印机通过许许多多的小打印头将液体黏合剂挤压到沙床上，黏合剂含有催化剂能够快速黏合沙子。反复工作4遍之后，打印层开始凝固，再将新沙子撒到上面，重新校对自动化手臂，在第一层的上面重

新涂一层黏合剂。打印的墙壁凝固需要花费约1天的时间。

我们在恩里科的网站上看到，黏合剂非常牢固，可以替代铁来加工建筑。由D型打印机打印的人造石头能够由任何一种沙子支撑，而且比普通水泥更坚固、便宜。3D打印的砂岩结构比采用传统建筑材料建设更方便快捷。



图10–10

注：恩里科·迪尼用沙子和黏合剂打印出的结构。石面坚硬且光滑，外形和曲线很难用石头或大理石手工雕刻出来。

图片来源：Enrico Dini and Andrea Morgante

在写本书时，我不知道有没有人住在3D打印的房子里。但也许有人会做第一个吃螃蟹的人，来感受一下打印房屋里的各种设计构想。跟传统3D打印机能够自由打印形状一样，建筑物3D打印机能够在一个更大的范围内打印奇特而不寻常的物理形状。想象一下生活在一个有巨大石头圆顶或者像印第安人村庄的房子里，你可以对你的屋顶进行各种装饰，甚至可以打造你自己想象的怪兽状滴水嘴。



图10–11

注："神奇板凳"是3D打印的水泥产品。使用传统的水泥浇灌技术不可能造出这种曲线和中空的内部管道。

图片来源：Sungwoo Lim and Richard Buswell. Photo: Agnese Sanvito

目前尚无法预估3D打印混凝土房屋的未来。但在小范围内，大家可以从打印一个简单的混凝土户外长凳开始。拉夫堡大学的一个研究小组（现设于诺丁汉大学）通过对轮廓工艺运行原理的整合和扩展，制造出3D打印水泥产品—"神奇板凳"。

神奇板凳是一种内部带有通风管道的蜂窝状结构，研究者将其称为"空隙"。这些空隙可以作为良好的保温载体，或者只是简单地提供一个开放空间来安装额外的建筑部件，可能是我们之前提到的管道和电线。神奇板凳向我们展示了3D打印更大型且复杂的建筑结构的可能性。打印的建筑结构可能包括内置的电路、电线和水管，还可以包括智能空间或空隙。这样，之后就可以很容易地添加额外的住宅基础设施。

机器人设计师

斯蒂芬·托德和威廉·莱瑟姆在一本有关计算机图形学的著作《进化艺术和计算机》中解释道："计算机不会盲目地服从指令，它们只是用来提供建议，从而使艺术家们保留决定最终审美选择的权利。"而下一代的智能设计软件工具就会具备相同的设计效果。

总有一天，创作的过程将会由智能响应型软件或者"机器人设计

师”进行辅助，这将加速实现设计解决方案。如今，计算机算法已经能够提供超出设计师所能想象的更为复杂的设计解决方案。未来，连接到3D打印机和数据源的机器人设计师将会改变设计师、艺术家或者建筑师的角色。

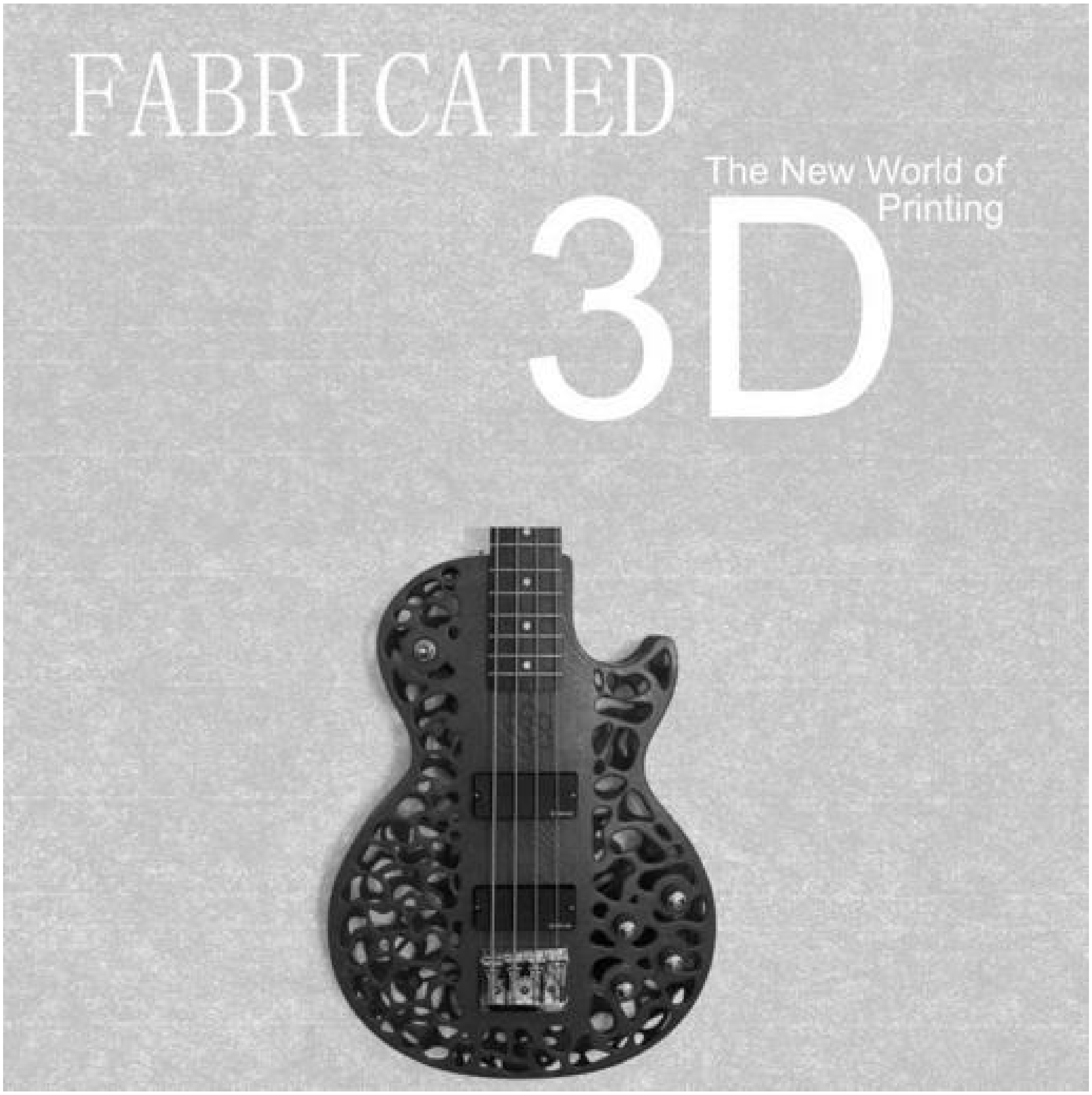
未来，人们将不再花时间起草和测试可能的设计方案。相反，我们将拥有对设计目的、设计约束和设计内容具备较高水准的机器人设计师，而人们只需要定义目标解决方案的参数。未来，设计师、艺术家和建筑师不会被新工具淘汰，相反，他们将会达到一个崭新的创作高度。

【注释】

(1)1平方英尺≈0.09平方米。

(2)1英尺≈30.48厘米。

第11章　3D打印：让制造业不再有污染



蔚蓝的天空下，一个戴着圆顶硬礼帽和墨镜的男人迎着灼人的阳光站在一片广阔的沙质平原上，他旁边是一个闪闪发光的金属装置，大概有一个小城市公共汽车站的大小。机器顶部是两块黑色太阳能电池板，附近的一个小型金属布帐篷就是他的移动办公室。

他蹲在一个类似打开的公文包的东西面前，耐心地解开里面冒出的一堆颜色鲜亮的电线。身后的大量沙丘更突显了他身着的阳光下耀眼的白色衣服。

当他将公文包里的电线摆放妥当后，就将公文包与机器相连。机器

的金属框架与覆盖铝箔的线轴连接在一起，使人联想起《绿野仙踪》里铁皮人的膝关节和肘关节。

当太阳能电池板发电时，机器的齿轮开始转动。一个厚矩形玻璃片通过一只可调手臂连接在金属框上，这是一个巨大的放大镜，它的镜头将太阳光聚焦成一束强光。

他利用这个可移动手臂调整放大镜，将光束对准一个满是沙子的平底锅。他把笔记本电脑跟机器相连，坐下来观察会发生什么。机器的手臂将镜头来回移动，对准光束焦点的沙子开始冒泡并熔化了。就像观看熔岩熔池的延时拍摄视频一样，在这个过程中，沙子的温度加热到了1 500摄氏度左右。



图11–1

注：马库斯·凯泽使用太阳能启动这台3D打印机，打印机通过一个巨大的透镜折射阳光，从而将沙子熔化成形。这里是摩洛哥沙漠，但这一幕可能发生在任何一个日照强烈和沙子丰富的地方。

图片来源：Markus Kayser

巨大的放大镜有条不紊地描绘出一个圆形，这个圆形慢慢地变成一个三维形状。熔化的沙子冷却并凝固，又有新的沙子堆积在上面。机器继续工作，将新一层沙子熔化在冷却凝固的沙子上面。最终，他从沙床里拿出一个大的碗状物，并宣告工作完成。

一辆白色的卡车迎面开来，一群戴着包头巾的人迅速将机器装入吉普车后备箱。这位神秘的沙子炼金术士一跃跳上车，他的圆顶硬礼帽紧紧地戴在头上，他的衣服依旧是一尘不染的白色。当车驶向远方，这片沙地平原恢复了平静，好像刚才的制造过程没有发生过一样。

沙漠的这一幕发生在摩洛哥，这名男子是马库斯·凯泽，那台机器就是太阳能3D打印机，马库斯称之为“太阳能烧结器”。在绿色制造的示范过程中，太阳能3D打印机的原材料就是沙漠里的沙子，机器附带的放大镜把这些沙子熔化成玻璃。

马库斯这样描述：“在这项试验过程中，使用3D打印生产玻璃制品的原始能源是阳光，原材料是沙子。该过程融合了高新生产技术以及自然能源和材料。”这个视频我看了很多遍，我被那静谧广阔的沙漠、冒着气泡的沙子以及耀眼的阳光深深吸引。

太阳能烧结器的生态设计非常巧妙，它的运转动力来自太阳能，打印机的“激光器”是汇聚的阳光，它的原材料是地球上最常见的天然物质—沙子。沙子熔化后就变成玻璃，一种坚固且用途广泛的材料，制造过程并不需要额外化学添加剂或胶水。如果打印的玻璃品被丢弃在沙漠里，经过循环最终还是会变成沙子。

当我观看视频的时候，我意识到太阳能烧结器也许就是自我孩童时起就冥思苦想的一个问题的答案。我在以色列长大，一个拥有丰富沙土的平原国家。在沙漠上修建公路造价高且困难，沙土地基一点儿也不稳定，同时由于沙子会流动，会被风四处吹散，道路会被掩盖，最终也就不成路了。

当我还是个孩子的时候，我就想知道政府为什么不把沙漠中的沙子熔化成坚硬的马路，有些类似于“玻璃之路”，这样汽车就能在上面驶过。想象一下，如果将马库斯的太阳能烧结器装上车，配上全球定位系统，再开到沙漠地区打印马路，也许一位人类“老板”就能够监管这些太阳能烧结器的“雇员们”。流沙将不再是一个问题，相反，松散的沙子可以作为有用的原材料制成玻璃公路。美国国家航空航天局正在探索利用月球的沙子在月球上进行类似的3D打印。

在理想世界里，所有的制造过程都如太阳能烧结一样环保。不幸的是，目前大多数制造过程都以石油为动力能源。工厂和全球的运输网络（称为供应链）留下了庞大的碳足迹，排放了大量的温室气体。

制造过程仅仅是问题的一部分，垃圾是大规模生产对环境造成的另一种灾难性副作用。廉价而丰富的大规模生产的产品一般生产了就要被丢弃，问题是丢弃了却没有消失。玻璃和废纸可以回收，但大多数大规模生产的塑料却不能回收，也不可能被降解回归环境。一次性的塑料产

品会存在几十年，流入填满垃圾回收站，并污染我们的海洋。

3D打印技术为我们提供了一种更清洁、更环保的产品制造方法。没有一项技术天生就是环保的，重要的是如何使用它。

两个塑料玩具的故事

如果有人递给你两个同样大小的塑料玩具，一个是大规模生产的，一个是3D打印的，你能否猜出哪个玩具的制作过程对环境造成的污染更小？很多人都会直接得出结论：3D打印的塑料玩具比大规模生产的塑料玩具更环保。你同意吗？

答案取决于每个玩具的产品生命周期，或者说由生产、销售渠道以及将产品送到最终目的地（即销售点）的储运所形成的产业链。每个产品生命周期的末端都是废弃处理，人们玩够了就会将其扔掉。

想象一下，假设这两个塑料玩具会说话，你问它们是在哪里制造的、怎么组装的，最后怎么到达购买者手里的？

假设大规模生产的玩具首先回答你的问题。它会告诉你，他的生命雏形是一大堆鱼卵大小的塑料球，称为“原料球”。有时会有调皮的原料球逃出包装袋，被冲进海洋和河流。这些原料球随着水流曲折前行到营养丰富的浮游动物聚集基地，使那里的海洋动物和海鸟们窒息并慢慢受到毒害。形成这个玩具的原料球则被倒进了一台注塑机里，从而成为一只玩具的外形，被扔在了流水线上。

流水线很可能就位于中国南方的一家近海工厂，全世界大概80%的玩具都产自那里。这个大规模生产的塑料玩具就是这家公司生产的成千上万个相同塑料玩具中的一个，它第一眼看见的人类面孔可能就是将它全身塑料零部件啪啪组合在一起的工厂工人。

大规模生产的玩具也许看起来都很普通，大多数都是四海为家的“全球旅行者”。这个玩具和它一模一样的同伴们被装在一个运输箱里，离开了生产它们的工厂，并开始了几千英里的旅程，轮船、火车、汽车，一路的碳排放。旅途的终点是一家商场的库房，工作人员开始拆箱。几周后，这个玩具就上了商场的存货清单，放置在货架上等待出售，并抵达它的最终目的地：一个孩子愉快地把它带回家。

假设这一场景继续演下去，下面该轮到3D打印的玩具回答问题了。这个玩具会解释它是独一无二的，它的设计并不是由玩具公司的市场营销部门或者设计部门构思出来的，相反，它的设计是基于一个视频游戏—《阿凡达》。

这个3D打印的玩具色彩鲜亮，就像它的设计灵感来源—视频游戏《阿凡达》一样，它也拥有褶皱精致的斗篷，披在它的肩膀和后背上。

打印玩具的生命雏形不是一堆塑料球，而是一堆塑料粉末。一位客户在公司网站上下了订单，上传他的游戏人物，并输入了信用卡密码后，3D打印玩具最终获得生命。

当玩具公司收到订单后，公司的工程师就开始将上传的数字化文件调整为可打印的设计图纸。大部分转化过程是自动进行的，因为游戏人物的数字化形式已经存在了。设计图纸最终获得客户的认可后，被送到附近的一家小打印店里打印出来。

故事讲到这里，3D打印玩具会这样描述第一眼看见它的那个人：一位把它从打印台上拉起来的打印店员工。这位技术熟练的“接生婆”掸去玩具身上多余的粉末，用软布擦亮，抛光。最后，另一位打印店员工将成品放进一个小纸盒里，用联邦快递把它送到了客户手中。

哪个塑料玩具的生产过程更环保？从第一眼看，似乎3D打印的塑料玩具对环境的污染更少，它是在发达国家的一家干净整洁、符合规定的打印店里制作出来的，那里的工作条件优越，安全标准达标，人们遵循各种劳动法规。运输一个小小的联邦快递包裹留下的碳足迹远远小于运输几百个大纸箱。3D打印玩具与工厂注塑机毫不相关，也没有在集装箱、卡车或者飞机里沿着碳排放的轨迹环游世界。它的店面就是一个简单的网站，不需要加热，也不需要点火。

这样看来，3D打印过程仿佛是环境保护的救世主，但考虑到两个玩具都是用非生物降解塑料制成的，每制造一磅产品，一台3D打印机的耗电量至少是一台注塑机的10倍。尽管名声不好，注塑机实际上非常清洁节能，当推动塑料球成形时，注塑机几乎不产生任何废物副产品。最后，大批量运往各地的小规模货运流通网络也并不环保。综上所述，我们得出的结论是：如果3D打印成品运输扩大至全球，那么就没有任何环保意义了。

更绿色环保的制造

能否实现更绿色环保的制造取决于能否全面开发3D打印独有的制造能力。3D打印技术具有如下取代大规模生产制造的潜力：首先，3D打印机制造出的产品外形能够根据应用或环境进行优化；其次，对堆满货物的仓库进行维护会加重环境负担，相比之下，储存随时可以打印的设计图纸或者数字化的产品清单更经济环保；再次，总有一天，分布式的3D打印制造可以使各公司就近进行本地生产；最后，3D打印技术还可以进一步开发其潜力，使用可回收利用的或环保的打印材料进行生产。

低碳制造：3D打印能做到

低碳曾经意味着仅限于面包、意大利面和土豆的饮食。在制造业

里，低碳意味着“低碳排放”，一种更有效节能的设计生产方法。对于在诺丁汉大学（之前在拉夫堡大学）的研究人员来说，低碳制造意味着降低整个产品生命周期内的碳足迹，包括从产品设计到产品生产、部件组装、运输分配以及最终的报废处理。

“现在的产品从设计制造到最终分销给消费者，各个环节通常都很浪费。”诺丁汉大学教授理查德·黑格解释道，“这主要是由于传统制造过程限制了我们目前的设计、制造和供应链。”理查德和几位同事对3D打印和传统制造所留下的碳足迹进行了深入的对比研究，他们将研究成果称为“阿特金斯可行性研究”（向著名的阿特金斯低碳水化合物饮食法致敬）。

阿特金斯可行性研究的目的在于评估3D打印机能否减少制造业的碳足迹。研究人员测量了制造过程的每个方面对环境的影响：能源消耗，制造过程产生的废料，运输网络。为了完成整体性评估，研究人员进行了计算，试图得知优越的设计和优化的产品外形（仅指3D打印生产的优势）能否在接下来的整个产品生命周期里给环境带来益处。例如，优化的3D打印产品能否在重量上更轻便、在性能上更优越、在耐久性上更出色。

结果很复杂，总体而言，与传统的制造机器相比，在制造相同重量的零部件过程中，使用聚合物材料的3D打印机的耗电量至少是传统制造机器耗电量的10倍。工业规模3D打印机使用激光器（或者高温）凝固粉状聚合物，与注塑机的注压成型过程相比，多产生约65%的废弃塑料材料。研究人员分析的一些3D打印机需要使用热固性聚合物，这种材料不能回收，因为如果加热就会改变它的材料属性。这些结果表明，尽管3D打印过程精度很高，但不是所有的3D打印制造过程都是无废料可循环的。

研究人员发现，打印有很多较大空隙的塑料产品的制作过程特别浪费。中空的物体需要更多的支撑材料，这些材料会产生额外的废弃塑料粉末。尽管一些多余的支撑材料可以回收，但是研究人员发现，平均只有40%的多余原塑料粉末在接下来的打印过程中可以回收利用，而其余60%则通常被倒入垃圾处理站了。好消息是水溶性的支撑材料利用率越来越高。

研究人员发现，与注塑机的冷却过程相比，打印塑料对环境确实有一些好处。由于打印塑料的生产过程缓慢，大部分3D打印的部件制作出来后都不是特别热。而在注塑过程中，当塑料球被用力挤压进模具里时，它们就变得非常热，这时就需要冷却剂。通常来说，工厂需要使用一种叫作“脱模剂”的有毒化学物质将塑料从注塑模具中弄出来。

对比3D打印塑料，3D打印金属相对传统的金属制造技术具有更多的优点。研究人员发现，几乎所有3D打印剩下的金属粉末都能回收利用。相比之下，传统的金属制造过程（研磨、机械加工或铸型）更浪费，在使用某些金属制造方法时，废弃副产品中竟剩下90%的原材料。例如，制造一个1千克的飞机零件就需要消耗多达15千克的金属原材料。

由于阿特金斯可行性研究的目的在于研究整个产品生命周期过程中产生的碳足迹，研究人员对3D打印在全球供应链中对下游的影响进行了分析。如果公司使用适合3D打印的制造模式，如数字化库存、当地即时生产以及分散式的制造模式，那么生产制造的过程就可能实现绿色环保。阿特金斯可行性研究的结论就是，应用阿特金斯制造方法生产适合的零件和组件，特别是体积小但价值高的零部件，可以有效地降低库存成本和库存水平。

3D打印制造对环境的益处是微妙的，其中一个最有希望、也是迄今为止尚未探索的是设计优化。研究人员宣称，有了3D打印，传统设计制造标准“是可以忽略的，设计师们可以设计任何他们想要的、需要的产品，而不是设计生产系统能够制造出来的产品”。高性能的零部件能够从多方面有效降低生产过程所产生的碳足迹。

高性能零部件打印：喷气式客机也能打印

计算机可以很好地解决问题，计算机生成的设计创造了新的产品类型，减重就是一种能显著降低产品碳足迹的方法。例如，飞机的重量每减少1千克，飞机每年消耗的燃料将减少约600升。



图11–2

注：这个金属飞机零部件由计算机程序设计，并使用3D金属打印技术

制作。后面的是旧版本，前面的新版本进行了优化，重量减轻，同时保持原有强度和其他关键性能。

图片来源：www.paulmcmullin.com. Designed by EADS, UK

产品优化的形式多种多样。由于是专门针对周围环境设计的，所以一个巧妙设计的零部件可以使用更长时间，也更节约能源。例如，可以把3D打印的定制发动机零部件设计成能够携带大量冷空气或者能够承受更多的重量。

另一种优化产品的方法就是尽量减少零部件，最好做成一个整体。生产制造的一般经验法则就是：一个产品的零部件越多，它所消耗的资源就越多；一个产品需要组装的零部件越多，产品的供应链就越长，产品的库存就越大。

由于3D打印机独特的制造工艺，所以能够通过一次打印完成产品的生产。如果未来的制造商能够打印经过设计优化而简化组装过程的零部件，那么就可以降低对环境的污染。一条现代化流水线制造过程需要运输或装配的零部件将有所减少。

波音公司发现，可以使用3D打印技术为一架喷气式客机打印一个导管，而过去这个导管是由20个不同组件组装而成的。一旦该导管可以打印成一个整体，也就不再需要组装了。波音公司发现这样可以精简库存，存储设计图纸，按需求打印零部件（而不是存储和运输实体零部件）可以减少存储空间，降低管理开销。

制造过程清洁化

很多人清楚毒烟滚滚的工厂对环境的破坏力，却意识不到供应链中化石燃料的缓慢燃烧也许比工厂的污染更具破坏性。在全球范围内运输材料和零部件会产生大量的污染。据沃尔玛公司估计，其公司约80%的碳足迹是由其庞大的全球供应链产生的。

通过全球供应链，原料被运到工厂，然后运到装配线，最后到达消费者手中。我们所有人都依赖于这种全球供应链的流通。生活中我们购买、消费以及最终丢弃的每个大规模生产的产品，比如最平常的塑料玩具、外科手术中可以拯救生命的医疗设备，几乎都是这一漫长而曲折的全球供应链的产品。由于工业运输队伍（卡车、轮船、飞机）燃烧燃料会产生大量排放物，供应链的碳排放量惊人。

存储未销售和未使用的库存产品的仓库需要进行照明、加热或冷却，该过程消耗电能。以数字化库存代替实际库存将会使供应链更加绿色环保。实际库存货物不仅需要运输，而且在等待销售的过程中也占用了大量的货架空间。相反，3D打印的数字化库存或设计图纸成本相对

较低，且易于储存和运输。

如果能够利用3D打印的独特能力，那么就可以使制造过程清洁化。但是，目前的难题之一是产品生命周期的末端。回想一下本章开始部分关于两个塑料玩具的假设例子，两个玩具都是用标准的工业塑料制成的。

如果两个玩具都被扔掉，那么它们的归宿相同吗？不幸的是，答案可能是肯定的。问题在于原材料都是塑料，3D打印和注塑机使用的都是相同类型的商业塑料。就像弟弟和哥哥姐姐们吃相同的食物，由于3D打印机也是在工厂里“长大”的，3D打印机对批量制造所使用的原材料有着相同的胃口。

3D打印的垃圾站更清洁、更美妙

3D打印材料这一新鲜事物受到很多媒体关注，例如含有活细胞的巧克力或凝胶。其他打印材料（如金属、陶瓷和玻璃）都逐渐应用于工业生产。根据打印材料的市场销售追踪数据，塑料仍位居榜首。

3D打印机旁边摆着的一般都是装满塑料粉末的桶，或是如同轮毂罩大小的颜色鲜艳的塑料线轴。粉末形式的尼龙是最受欢迎的。其他较常使用的打印塑料粉末包括聚丙烯（制造酸奶盒的材料）以及聚乙烯（用于制造垃圾袋）。

每台MakerBot打印机在运送给买方之前都要对其进行测试。2012年，当我在纽约布鲁克林参观它从前的生产设备时，我发现一行行色彩鲜艳的ABS塑料线轴悬挂在打印机上方，这一场景让人感到很愉快，使人联想起一盒全新的蜡笔。跟MakerBot打印机相似的是，大部分受消费者欢迎的低成本3D打印机都使用一种叫作“ABS的塑料”，而这种塑料常被用于制造乐高玩具、白色塑料皮划艇以及硬塑皮箱。

塑料成为3D打印的主导材料的原因如下：首先，塑料价格便宜，易于加工；其次，塑料长期以来一直作为大规模生产的原材料，从制造最简单的瓶子到复杂昂贵的船体都可以使用塑料。

有时人们会用“塑料”这个词贬低一个人或一样物品不够真实。事实上，塑料是如此真实地存在，它已成为我们地球上迅速增长的主要污染源，2000年生产的塑料是1960年生产的25倍。

记者苏珊·弗赖恩克尔追溯了人类社会对塑料的依赖程度的变化，从最开始迷恋使用塑料发展到现在她称之为“畸形的恋情”的对塑料的高度依赖。大约150年前，当人们首次生产出塑料时，塑料被预言为可以使乌龟和大象免于灭绝的新材料。第二次世界大战后，塑料的使用范围越来越广。根据美国化学理事会的统计，塑料在1976年成为世界上应用最

广的材料。

如今使用的大多数塑料都是由化石燃料（包括天然气和石油）制成的。塑料成本较低的原因之一就在于它是由从环境中提取化石燃料的过程中产生的废弃副产品制成的。在演示分子是如何彻底改变一个物体属性的过程中，人们发现塑料含有大量的碳和氢，这是构成生命体的标志性元素。

塑料品的耐磨性和耐腐蚀性是塑料能够广泛应用的原因，但是同样的韧性和耐久性也使塑料产品对环境构成了极大威胁。不管塑料被扔多远，从垃圾桶到垃圾站，或者最终被冲进大海，它们就像一群快速增长的无法生物降解的废物僵尸大军一样。

1997年，查尔斯·穆尔在北太平洋的一个偏远地区进行航海旅行时，他震惊地发现他的船被一大片漂浮的废弃塑料所包围。穆尔称这一片塑料粒子的流动区域为“太平洋垃圾补丁”，其大小估计和得克萨斯州的面积相当。

这一场景震惊了穆尔，他在他的《塑料海洋》（*Plastic Ocean*）一书中描写了这段经历。从此，他就将收集和分析海洋漂浮的塑料垃圾作为自己一生的事业。多年来，穆尔和他的船员们定期前往“太平洋垃圾补丁”打捞并登记塑料垃圾，大部分塑料垃圾都是以小颗粒形式存在的。

大多数在海上漂浮的塑料都不能降解，会一直存在。随着时间的推移，海浪将漂浮的塑料垃圾打成小碎片，也就是穆尔所描述的塑料“五彩纸屑”，从卫星照片上看不到这些碎片，但它们真实地存在于海洋生态系统中。漂浮在海洋上的庞大垃圾岛屿每年不断扩大，破坏海洋的生态环境，使海鸟和海豹窒息而亡，并将有毒的副产品留在了生态系统中。

穆尔的报告称，渔网捞到的塑料“五彩纸屑”的重量是海里浮游生物的6倍，而浮游生物是海洋的食物基础。除了小的塑料碎片，他的渔网也捞到了很多肉眼可以识别的日常塑料制品，如一次性打火机、塑料渔网、塑料手柄、儿童玩具，当然还有塑料瓶。

如今，同工厂大规模生产的塑料产品相比，3D打印塑料零部件数量非常少。如果将其放在“太平洋垃圾补丁”旁边，3D打印的塑料垃圾的体积微乎其微，就像在一个足球场边上摆了一只儿童鞋。然而像其他的塑料品一样，无论它是定制的还是大规模生产的，大多数3D打印产品在到达生命周期末端时都将被扔进垃圾桶。

3D打印的开创者和预言家乔瑞斯·皮尔斯指出，如果我们继续按照现在的全球消费率消耗和丢弃物品，我们将会在自己丢弃的废物里窒息。一篇名为《3D打印与规模制造—一个更美丽的垃圾站》的博客文章写

道："我担心大规模生产最终可能导致大规模灭绝……我真的相信我们正走向灭绝之路……就像复活节岛人一样，我们也将砍倒最后一棵树。"

塑料对环境具有破坏性，然而塑料也是一个伟大的"民主均衡器"，使每个人都能拥有曾经只有富人才能使用的家居用品。塑料制品应用于生活的方方面面，从普通的塑料玩具到救生时用来输血的塑料管。

用塑料制成的汽车发动机部件和汽车内部器件比用金属制造的部件重量轻，而减轻重量对环境有利。塑料包装可以用来保存食物。同时，塑料带来了就业机会：塑料产业是美国最大的雇主之一。与塑料行业相近的包装行业发展更大，在世界范围内，包装行业排名第三，仅次于食品和能源。

不论是兴盛时期还是衰落时期，我们的经济都以塑料产品为中心。3D打印可以使普通人在家里生产塑料产品，从而开辟了一条塑料制造的新渠道。为了成为更绿色环保的制造方式，3D打印技术需要使用新型环保原材料。

变废为宝：绿色环保打印

为了了解更多有关绿色材料的知识，我同西雅图华盛顿大学的工程学教授马克·甘特尔进行了交谈。马克解释说："市场上的大多数打印材料都不是真正的环保材料。"马克和他的同事杜安·斯托尔蒂教授在华盛顿大学一起建立了一家索尔海姆实验室，主要针对基本的3D打印技术进行研究。很多年前，马克和杜安各自拿出一个月的工资为实验室购置一台3D打印机，这也是校园里的第一台3D打印机。从此以后，他们在这方面的研究从未间断。

实验室的主要研究领域之一就是可降解的3D打印材料，包括开发和测试环保再生材料。索尔海姆实验室的学生们用3D打印技术打印出了"糖、木头和蟹壳等各种各样的产品"，一名学生用3D打印技术打印出了一件实验性的混合产品，由于血液的凝血能力强，产品中添加血液作为黏合剂。

马克解释说，一台3D打印机基本上能够生产"任何可以打磨成合适颗粒大小的东西，我的意思是任何东西"。关键是能够把材料磨成合适的颗粒度和质地，使这些粉末可以平铺成一薄层。一旦材料磨成粉，就需要使用合适的黏合剂。这种黏合剂粉末与原料粉末混合在一起，放入打印床，铺成一薄层，然后打印头中释放出溶剂激活黏合剂材料，从而使粉末黏合在一起形成打印层。

该实验室有关绿色打印的突出成果之一就是利用可回收牛奶盒制成

的一艘3D打印船，这艘3D打印船在西雅图一年一度的赛艇比赛上获得了第二名。该实验室的学生组织WOOF（华盛顿开放对象创客俱乐部）设计并打印了一艘船，并参加了牛奶盒船竞赛，这是西雅图年度海洋节的一项非常有名的比赛。牛奶盒船竞赛的规则非常严格，漂浮材料只能是用来盛牛奶或果汁的半加仑或一加仑的塑料盒或纸盒。

WOOF团队在比赛前几周就开始用废牛奶盒造船了。学生们都跑去翻垃圾箱，把将近40磅[(1)]的塑料盒拖回了实验室。他们把废塑料盒打磨成细粉，然后租来一台带有家用挤压机的等离子切割机。为了给打印机的塑料挤压机提供动力，本科生马修·罗格从他的汽车上卸下了雨刮电机。经过两个月的实验和几次失败的教训，学生们了解到在打印过程中用于打印的牛奶盒粉末大小会缩小2%。马克介绍说，通过不断修改设计，WOOF团队用两天的时间打印出了一条能够承重150磅的船，这条船可以像独木舟一样划水前进。



图11–3　使用赤陶打印的物品

图片来源：Mark Ganter and Duane Storti, Solheim Lab, University of Washington

WOOF团队带着这艘打印船出现在牛奶盒船竞赛的那天，马克·甘特尔说：“我需要解释一下这艘船。”与牛奶盒船竞赛委员会讨论之后，委员会认为打印船可以参加14岁以上组的比赛。获得比赛裁判批准后，距

离比赛开始只剩5分钟，马修·罗格和亚当·康芒斯将船放入水中，马修·罗格划着这艘船在14岁以上组的比赛中获得了第二名。

就环保而言，3D打印船是一项令人振奋的项目，因为它证明了可回收牛奶盒可以回收利用并打印成真正有用的物品。塑料牛奶盒由高密度聚乙烯塑料制成，这是一种广泛应用的、可回收利用的石油热塑性塑料。但是，大多数塑料都无法回收。根据美国环境保护局的数据，所有类型的塑料回收率平均为13%，远远低于废玻璃、废钢、废铝和废纸的回收率。



图11–4　使用废牛奶盒磨粉制成的3D打印塑料船

图片来源：Brandon Bowman, Washington Open Objects Fabricators (WOOF) slub, and Mark Ganter and Duane Storti, Solheim Lab, University of Washington

植物基塑料也许可以成为石油基塑料的绿色环保替代品。当我问马克是否有可用的绿色环保打印塑料时，他提到，PLA（生物降解塑料聚酸乳）可作为熔融挤压成型技术的3D打印材料，大豆塑料也是不错的选择。PLA是一种以谷物为基础的水溶性热塑性塑料，经常用于3D打印。PLA可用作支撑材料，另外，由于它的水溶性特点，也可用水清洗并重复使用。

另一种使塑料打印更绿色环保的好方法就是回收和再售使用过的ABS塑料打印纤维。马克说："我希望很快就有人开始销售可再生塑料纤维，我们的实验室和其他实验室已经开始就这个想法开展实验了。如果每家每户都能够回收家用的废塑料，并把它制成可用于3D打印的塑料纤维，那么会发生什么？"

也许第一批可再生塑料纤维很快就可以出现在市面上。佛蒙特技术学院的学生泰勒·麦克楠尼在众筹网站Kickstarter上筹集了1万美元，制造一种可以将废弃3D打印塑料产品打磨并熔化成打印塑料纤维的装置。泰勒将这件回收装置命名为Filabot，他的网页将其描述为"用户友好型，但是……同时也绿色环保。Filabot很快将为3D打印带来真正的可持续发展能力"。

可回收塑料是一个好的开始，但我们还需要做更多。"想要利用3D打印技术改善生活，我们需要想方设法利用废弃产品、食物副产品、可循环利用的玻璃和沙子，甚至泥土进行3D打印。"马克说。他打算继续开展研究，探讨是否有可能使用粉状食物材料作为3D打印的可持续原料。"大米粉几乎世界各地都有，而且用它打印效果很好。"他笑着说道，"而食物副产品，像玉米壳或小麦壳，成本也非常低。"

"绿色3D打印看起来似乎是一个令人惊讶的研究方向。变废为宝也许是一个童话，但这却是一个值得我们努力实现的想法，让我们看看能否实现这一想法。"马克总结说。

3D打印如何既环保又不浪费

3D打印对环境的危害与制造过程和原材料没有一点儿关系，这一风险也是一个新的思维方式。3D打印使人们能够设计并制作任何他们所能想象的实体物品，但常言道，"天下没有免费的午餐"。一种生产工具产生的同时也会诱使人们浪费。

几十年前，低成本激光打印机刚刚问世时并没有立刻促成无纸化办公，反而是廉价而又可广泛应用的打印技术使人们开始随便打印，造成浪费。同样，普遍存在的3D打印机可能导致更多垃圾的产生，人们可以随意制作物品，而这种制造的便捷性会造成浪费，但人们意识不到他们的行为所产生的下游成本。

人们会建议工程师、裁缝甚至外科医生，在动手之前一定要多测量几次。当生产成本或风险很高时，设计师或工程师会一次又一次地测量和规划，以确保生产能够按计划进行。易于使用的设计软件和唾手可得的3D打印机很容易会使人们忽视环保。不幸的是，3D打印使某些易受影响的人产生了一种"非理性制作"的想法。

我已经亲眼看到了非理性制作的影响。有一天早上我来到实验室，发现20多个打错的、形状类似的塑料品随意地摆在实验室3D打印机旁边的桌子上。原来这些垃圾的创造者是我的一个学生，他为了课程作业在实验室里熬了一晚上，疯狂地一遍遍打印有瑕疵的图纸。就像一位受挫的作家一页页扯掉不满意的作品，这位学生打印出一件设计作品，略微调整了设计图纸的尺寸后，又打印了一遍，希望下一个会比上一个打印效果更好。

软件工程师通过编辑和数字形式的测试对未完成的比特码进行调制，但是编辑和重新编辑坏编码的过程并不会毁掉之前的原材料。它只是浪费了时间以及开发者的耐心，却并不会将垃圾桶填满这种畸形的塑料物品。

由于3D打印机加快了原型机制造的进程，不环保的调试过程已成为一种人们可以真正触及的选择，至少对于一些小东西来说是如此。如果人们使用3D技术打印尚未成熟的设计理念，而不是先在计算机上模拟或测量两三次的话，他们的思路也许就是在调试而不是在设计了。目前对实体物品的调试既昂贵又费时，3D打印技术使人们可以很容易地通过打印测试他们的设计图纸，而这是他们之前只能通过手工雕刻或是大规模生产技术进行设计时做梦也想不到的。



图11–5　失败的打印品：我们是不是在通过试验和纠错进行设计

可以想象，如果你去任何一家允许学生或工程师无限制使用3D打印机的商店或实验室，那么任何一个桌面上都会堆满失败的3D打印试验品。但在某些情况下，当使用仿真软件不能很好地检查复杂的设计时，

实物调试也是有好处的。随着设计的复杂化，即使是一位技术熟练的工程师也不可能仅仅通过盯着计算机显示器，就预测出打印出来的成品到底行不行。好的计算机建模软件能够辅助模拟一个设计对象的物理属性，但是仍然替代不了实物。

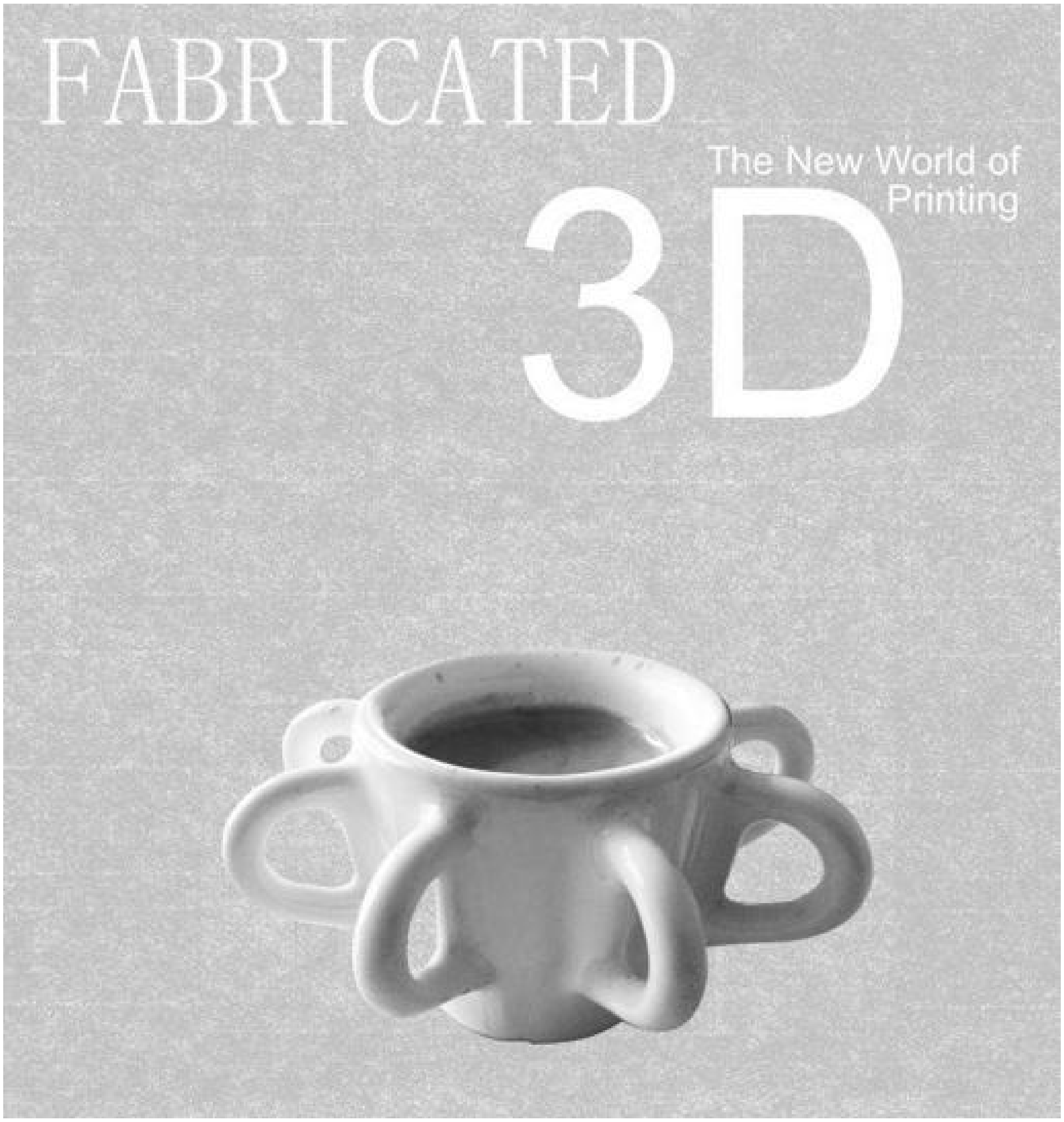
快速制作的3D打印原型可以减少规模生产流水线上的浪费。把数字化的设计图纸打印成实物，工程师和设计师可以最后一次确认他们的产品方案是否可行。而在规模生产中，设计问题和审美缺陷可以在机器开到高速制作档前进行纠正，这时已经消耗了大量的能源，并制成了成千上万个错误的版本。

3D打印技术给环境带来希望的同时也带来了风险。从现在开始计算，在未来的20年中，如果查尔斯·穆尔还能在“太平洋垃圾补丁”那里打捞到3D打印的塑料玩具、定制淋浴窗帘环或其他塑料制品，那3D打印技术就太令人失望了。理想情况下，所有的制造过程都应该像沙漠里的太阳能烧结过程那样绿色、创新。3D打印技术不可能天生就是绿色环保的技术，我们必须积极努力地打造并改善3D打印技术。如果我们能够在开发3D打印技术独特能力的同时，也开发更绿色环保的打印材料，那么我们将给环境带来更多益处，产品的供应链会缩短，从而形成新一代的优化产品。

【注释】

(1)1磅=0.453 5千克。—编者注

第12章　当武器和毒品也能打印、知识产权彻底失效时



法律可以是人们的保护伞，也可能成为人们的障碍，特别是在法律中试图定义安全或所有权等哲学问题时，这种现象更明显。我曾有过这样的实践经验，即在一个专门针对那些对设计和工程感兴趣的高中生的夏季研讨会上讲授知识。在为期一周的课程中，我主要通过使用简单的设计软件和实验室的3D打印机为学生们讲授产品的设计原则。该课程需要每个学生设计一款产品，并给它命名，而且要描述它的商业价值，并最终在Shapeways公司网站上发布和销售。

在一周课程临近结束时，学生们制作了丰富多样的产品设计方案。

在最后一堂课上，我给学生们演示了最后一步，每个学生将产品设计文件上传到Shapeways公司网站上销售。

这时，一个学生举手说：“如果我把我的产品设计文件上传到互联网上，有人下载并拿它制作一批复制品而付给我设计费，那怎么办？”值得注意的是，这个学生在刚开始上课的时候还乐呵呵地向他的朋友演示如何将自己的iPhone手机“越狱”，从而可以免费下载音乐。

另一个学生认为，也许不应该把产品设计的全部文件都上传到网上。她不确定为自行车车把设计的iPhone支架能否有效地固定手机，避免手机滑落而摔坏。还有一个学生说，他并不关心是否有人使用他设计的3D打印头解决3D打印的难题，他真正关心的是是否有人拿了他的设计并据为己有。

这些高中生用了几分钟时间就指出了摆在眼前的法律挑战。就像几十年前的计算机行业一样，现在我们身边的3D打印机及相关服务市场还处于起步阶段。这是一个开放的前沿领域，很少有人涉足，其中的商业氛围也不浓厚，以至于还没有引起国会议员、企业诉讼律师和犯罪分子的广泛关注。

新兴的且能够改变游戏规则的技术，其后续影响是难以预料的。看看我们的个人计算机，也就是短短10年左右的时间，计算技术已经从根本上动摇了我们的法律制度。

一个简单而直接的问题出现了，基于互联网的商业交易产生的本地销售税或增值税（VAT）已成为一个复杂的会计问题。在互联网上，跟踪犯罪已经有了一个全新的内涵。有些公司自行将消费者隐私保护法进行延伸，它们无耻地跟踪客户的互联网搜索、浏览记录以及购买习惯。有组织的犯罪不再是一个集中的、局部的现象，网络犯罪分子正在遥远而隐蔽的地方从事欺诈和间谍活动。

当计算机作为一个昂贵的工业工具在数据中心的密室里工作时，它们并没有引起很多新的法律挑战。然而，当计算能力达到一定规模时，个人和企业很快就发现，现有的法律法规是远远不够的。所有权的核心法律定义以及它的定位和形式等都需要重新定义。

与其他经历了技术快速发展的行业一样，3D打印行业也将遇到新的法律挑战和新形式的消费者安全和犯罪活动。法律变更的速度较慢，但技术不会坐等法律的改变。

打印武器、毒品和假冒伪劣产品

制造假币曾经具有一定的技术难度。美国特勤局在最近的公共服务公告中指出，现在的假币制造已演变成新的犯罪类型，造假者需要的只

是“基本的计算机培训和通过尝试和纠错后得到的技能，以及公共教育”。

在1995年之前，只有不到1/100的假币是使用计算机和激光打印机制造出来的。短短5年后，在2000年，就有将近一半的假币是在线设计的，然后在高端彩色打印机上打印出来的。计算机设计软件、彩色激光打印机和碳粉技术使得制造假币日渐容易。传统的胶印方法较老，并且需要多年熟练的造假经验。

假币会造成经济损害，然而3D打印出来的假冒商品和未经批准的武器可能导致人身伤害。2012年，在一个名为Thingiverse.com的文件共享网站上爆发了3D打印领域里的第一次小规模道德冲突。

这个网站上的一个用户上传了一个设计文件，通过这个设计方案可以使用消费类3D打印机，以塑料作为原材料，制作出3D打印来复枪的部件。来复枪的这个特殊部件是枪支制造环节中唯一需要对用户进行背景审查的，这个设计文件使人们无须获得许可证就能拥有枪支。换句话说，通过3D打印技术制作枪的部件，就可以避开枪支管制法。



图12–1　用3D打印塑料制造的口径为22毫米的步枪的部件

图片来源：Michael Guslick

目前的法律还没有考虑到Thingiverse网站上出现的这一情况。3D打印团体的反应倒是值得思考。经过多次争论，他们最终决定让枪支部件的设计师将其设计文件从网站上删除。

此事过去几个月后，一个名为“Haveblue”（拥蓝）的网友，用部分3D打印塑料部件制造了一个可以正常使用的枪支。这个口径为22毫米

的步枪是一个3D打印部件和商业购买部件的混合体。枪的主体是塑料的，但其中装着金属子弹。

Haveblue在网上对枪支的性能做了总结，经3D打印出来的塑料枪部件非常强大，它能够发射200发子弹。完成这一切根本不需要特殊的设备，用一台使用年限较长的Stratasys打印机就能够打印出枪的部件，所使用的原料也只是普通的商业级树脂。枪的制造者大约仅需30美元购买树脂，就可以打印枪的部件。

这样，人们便可随时制造属于自己的枪支，同时，3D打印机也成为高科技罪犯的理想作案工具。一台3D打印机创建对象不可能通过手工或机器一次成型，例如，一支枪的外形可能最开始看起来像鞋或毛刷。3D打印机小巧且便于携带，它们可以做成一个又一个人们想做的形状，非常隐蔽，无须建厂，也不需要协作或者不必要的曝光。

造假和犯罪（像主流的制造业和设计行业一样）都需要新技术以实现更高的效率和创新水平。非法武器交易蕴藏了大量商机，它带来的暴利与贩毒相当。

打印特制药物

也许有一天你会告诉你的孙辈，我们那时候买药需要医生处方，购买危险化学品也必须得到安全许可。你的孙子孙女会睁大眼睛惊呼："这是真的吗？"

"真的！"你点点头，"在定制化学工厂出现以前，人们就是这样的。"

格拉斯哥大学教授尼基·奥尔森和李·克罗宁在一篇文章中描述了他们最近所做的项目，用一台低成本的3D打印机建造一个小型化学实验室。李·克罗宁和他的团队使用一个开源代码的打印机（Fab@Home）打印出了一个小型化工厂，他们称之为"反应器皿"。

该反应器皿是一种高分子凝胶，其内部包含一些容器，这样它不仅形状特殊，还能够发生化学反应。它就像一个玻璃试管，尽管内部发生化学反应，但试管一点儿不受影响。该反应器皿提供了一个隔离的环境，使发生的化学反应不受干扰。克罗宁和他的研究团队利用3D打印技术的高精度和数字控制，制作了一个包含多种器皿的自定义凝胶，可以用更低廉的成本催化复杂的化学反应。

在一个特殊的容器内进行化学反应的想法并不新鲜。大型商业实验室利用罐子或盒子等容器作为促进和催化化学反应的必要组成部分，这种做法已使用多年。所谓破坏性就是使利用低成本的工具促进复杂的化学反应成为现实的能力。

化学品和原材料曾经难以融合在一起，以开创一个新的设计空间，现在这种情况改变了，化学家也能无限探索更多类型的新化合物。这意味着快速的探索和创新，但也可能意味着创造出新的不受管制的物质或新的娱乐毒品。

李·克罗宁在本项目上取得了进展，他发表了一篇突破性的论文。他在文章摘要里描述了这一潜力："3D打印有可能通过创建定制的低成本设备改变科学和技术，而这在以前仅通过专用设备才能够实现。"换句话说，对药物和化学品的集中管制将面临设计和生产低成本工具带来的巨大挑战。

技术越强大，可能出现的滥用情况就越新奇和深远。所谓的DIY生产药品，打破了制作药物和化合物相对统一和一致的配方，它容许人们设计和生产自己的药物和强力的化学品，所以可能会导致监管噩梦的出现。

在美国，关于药物的"今日战争"已经不幸失败。监狱里充斥着非暴力罪犯，宝贵的税收都花费在了逮捕吸毒者上，而不是花费在更低成本和更有效的戒毒项目上。发达国家中因过量服用处方药致死的人数飙升。想象一下，如果人们借助打印出来的反应器皿制作一批自己喜欢的可以改变情绪的化学物质放在家里，这将是什么样的灾难。

小型化学工厂将会带来另一种风险，即无法识别化学物质。大多数药物和家庭用品一般都被分成可识别的种类，因此，在意外中毒或药物服用过量的情况下，专业医疗人士都会有一个标准的分析框架，用以帮助了解化学品对身体的影响以及如何治疗。如果人们自行打印出特制药物，医学界将需要更多的时间弄清楚患者究竟吃了什么以及如何救治。

然而，低成本的化学品也有可能提供给人帮助。克罗宁说："我们可以看到3D打印机进入家庭并成为家庭必备用品，这其中就包括制药。或许，像我们能从苹果公司找到精细控制的软件应用程序一样，消费者也有机会访问个人药物设计师，他们可以在家里使用材料制造所需的药物。"

3D打印时代消费者如何保护自身安全

引入3D打印技术的另一个风险将是对消费者安全的威胁。在大多数工业化国家，保障消费者安全都被认为是理所当然的事情。然而容易忽视的是，正是多年来已经落实到位的众多法律法规才得以确保我们不会买到伤害自己的产品。

至今还没有人受到来自3D打印机在打印时出现故障或由3D打印机本身带来（至少忽视了）的伤害。从法律方面来讲，保障消费者安全最困

难之处并不是抓捕罪犯，而是需要搞清楚当故障发生时法律层面的问题由谁来负责。

侵权法的名好听，但所起的作用有限。在英语中，“torte”一词表示油腻的奶油蛋糕，而少了字母“e”的“tort law”（侵权法）的含义与之完全相反。它要在产品出现故障或人们发生意外时弄清当事人之间的权责，以证明是否有罪。

根据侵权法，如果一方能够证明，在合理使用情况下它做出了合理的努力加以阻止并将产品故障的风险降到最低，那么该主体所承担的责任就结束了。例如，对于轮胎制造商来讲，如果每次在时速超过80英里时，其生产的轮胎都会爆炸，那么即便当时已属非法超速行驶，它也将被追究责任，这在日常生活中很常见。然而，如果轮胎的买主开车撞向路边而发生爆胎的话，轮胎制造商将不承担责任。

这是一个某天可能会出现在法庭上的场景，在这种假设条件下，错误在哪一方呢？汽车发烧友美好地憧憬着，在地下室车间，3D打印机能够制作一个用户定制的方向盘。毫无疑问，这个打印出来的方向盘并没有经过质量和安全检测。这些设计文件可以在一个广受欢迎的出售新奇汽车附件（如新奇的空气清新剂和换挡手柄等）的网站上买到。

汽车业余爱好者在线出售打印出来的方向盘，它的买家买到后将其安装在汽车上。几个星期后，他发现在高速行驶时要向左急转弯，根据用户量身打印出来的方向盘就会脱离，不过为时已晚，买家已经车毁人亡。

想象一下你就是辩护律师，为那个车祸致死的业余汽车爱好者家庭进行辩护，你会把错误归结在哪里呢？是做出错误设计文件的人？是负责3D打印并出售它的人？还是给这个零部件做广告的网站？或者是把有问题的轮胎安装到汽车上的制造商，3D打印机的制造商，还是原材料供应商？

标准有助于设定明确的责任界限。在早期的蒸汽机时代，锅炉常常爆炸，频繁造成损伤。针对这一情况，保险公司通过制定清晰的生产标准将责任进行了明确的划分。最终创建了一系列标准，如材料的厚度标准、安全边际和压力释放阀的标准，以确保锅炉可以承受最低的蒸汽压力要求。不符合标准的锅炉，将无法获得保险赔偿。

3D打印领域也将制定类似的标准，用于确定责任的边界。打印机生产厂商会争取给打印机进行认证，原材料生产商也都会尽量满足或超过最低材料的性能标准。在没有明确和标准界限责任的情况下，复杂的3D打印产品的制造商没有追索权，但可以完全不负任何责任—这种情况你可能很熟悉，就像你曾经阅读过的用户许可协议，你每次都是欣然

同意之后才能够安装新软件的。大多数软件在出售时都会这样声明："对任何特定用途的适用性不提供任何担保。"

犯罪分子将很快学会应用3D打印技术，以改进他们的非法产品和服务。我们都将面临新的风险，如果我们运气不好，可能就会买到粗制滥造或假冒的3D打印机器的部件，而这些部件却可能在关键时刻出现了故障。3D打印出来的武器和新的化学品如果落入犯罪分子之手，结果可能是灾难性的。在不远的将来，也许器官捐赠的黑市将转移到另一个黑市，而这个黑市充斥着无管制的、利用生物技术打印出来的人体器官。

在现实中，这些戏剧性的关注可能不会显著影响我们的日常生活。我怀疑，我们大多数人会遇到的法律挑战将是过时的知识产权法带来的。

3D打印时代的知识产权

在中世纪，人们互相争斗，以此获取土地控制权。部分经济学家将现代资本主义的起源追溯至中世纪，那个时代的公有土地逐渐划归私人所有。如今，各大公司争相夺取知识产权控制权，有商业价值的创意成为奠定现代经济基础的新沃土。

当数字媒体进入消费领域，臭名昭著的"Napster（纳普斯特）案"成为一个重大转折点，标志着音乐消费者与娱乐行业之间正式开战。3D打印领域尚未面临大规模的"Napster时刻"，人们猜测一向以坚决捍卫知识产权而出名的大公司（比如玩具公司、软件公司和传媒集团）尚未感受到未授权的3D复制产品对其公司利益的影响。

如今"等等看"的观望态度可能会随着3D打印技术达到一定的临界值并能分享一部分销售额而发生相应变化。在记者彼得·汉纳看来："如果说宣称所有人均可免费使用的3D打印听起来太完美而无法持续的话，那它的确无法持续下去。不管是偶然的还是预先设计的，其影响规模还相对较小，尚未触碰到实力派的利益。"

顽固的法律破坏者是一回事，热情的消费者和小企业主则是另外一回事，大多数民众和小企业主更希望3D打印有一个清晰的法律框架的指引。

假如有这样一个场景，小企业或者个人发烧友用3D打印技术打印出一个塑料玩偶，该玩偶是受著作权保护的卡通形象的完美复制版，该玩具的打印者将其放到个人网站上以20美元出售。

几周之后，跨国传媒和玩具公司的律师看到在网上销售的复制品后发送了一封"停止侵权"的信函。理由是在未经玩具公司许可也未支付许

可费用的情况下，3D玩具的打印者侵犯了玩具公司的著作权。“停止侵权”信函给出了两种解决方案：一是立刻将打印的玩具从网站上撤下来，二是与玩具公司协商许可方案。

此时，如果玩具的打印者认为是自己没有意识到著作权法，他可能会迅速而伤心地将玩具从网上撤下来，又或者他没有经济实力雇用一名律师与大玩具公司进行法律抗争，故事也就到此为止了。

然而，出现另外一种情形会怎样？如果玩具的打印者收到玩具公司发出的“停止侵权”信函后，认为自己没有侵犯玩具公司的著作权，结果会怎样？也许他会妥协，同意停止销售有侵权嫌疑的塑料打印玩具，之后他可能会重新设计并打印一套全新的玩具人物形象：带有全球许多国家总统头像的塑料玩偶，然后把不同的总统头像安放在被公众熟知的卡通形象的身体上面。利用设计软件和3D打印机进行此类修改是非常容易的事情。

传奇还在继续。玩具公司很恼火，再次向无畏的玩具打印者发出一封“停止侵权”信函。此时，大多数人或者小企业家们可能会放弃，因为他们无力承担巨额的诉讼费用，尤其是如果他们败诉的话，可能直接倾家荡产，连向公众诉说事情来龙去脉的机会都没有。

继续假设故事的发展。假如有一个志在捍卫民众自由权利的慈善家设立了一个法律辩护基金，专门处理此类案件。慈善家一旦知悉此类案件，就介入其中并支付相应的法律服务费用。玩具的打印者是一名理想主义者，他坚信著作权法应该做出修正从而为3D打印创造公平和可操作的制度框架。他接受挑战，同意与大型玩具公司进行法律对抗。

接下来会发生什么我们还不知道。鉴于玩具的打印者对玩具公司的销售额造成的影响非常小，大公司在权衡公众影响以及要付出的潜在法律成本之后可能放弃诉讼。但如果成千上万的小企业和消费者开始自主打印受著作权保护的玩具，那大公司可能最终真的会行动起来。我们可以以不同的方式演绎前述假设情形，比如如果产生争议的是受专利法保护的3D打印机器零部件的话，也会产生类似的法律效果。

在我们完成本书时，涉及知识产权侵权的完整诉讼并未实际发生。然而，考虑到数字媒体已有的法律案例，距离本书所假设情形的出现也不远了。事实上，涉及3D打印知识产权的一些小纠纷已经产生了。

一名英国年轻人因哥哥的动作玩偶激发灵感，设计并3D打印了一个塑料复制品。创作该玩偶形象的派拉蒙公司很不高兴，其律师团队向这名年轻人发出了律师函，警告其所复制的玩具侵犯了派拉蒙公司的著作权。在未曾预料的法律威胁的震慑下，这名年轻人无奈地做出妥协。

知识产权法是把双刃剑，有利也有弊。大公司把知识产权视为排挤

竞争对手和创新技术的有力武器，小发明家和艺术家依靠知识产权从专利或艺术作品的受益者或者受益公司那里获取应有的收益。暑期设计和工程课上的高中生并不关心是否被大公司敲竹杠，他们关心的是作品是否被其他创作者毫无信用地剽窃。

将来面临的挑战在于，需要确定一个可行的法律框架，将广袤的灰色地带和不同的立场都纳入其中。如果侵权嫌疑人属于职业盗版人或造假者，他们总是故意甚至恶意地侵犯他人知识产权的话，那么执行现有知识产权法是非常简单的事情。然而，当3D打印技术成为一种主流，单纯的“坏人”就不常见了。

商标

有一次我在加勒比地区的一个露天市场买了一个非常便宜的带有耐克标志的行李袋，标志上有一处细微的修改：耐克的旋风标志与另一个相对较小的垂直旋风标志交叉。做出此种修改是为了保护该行李袋的制作者，避免侵犯耐克的商标权。

如同专利和著作权一样，商标也被视作知识产权。人们用“品牌名称”或“标志”界定商标。商标传达的更具体的信息是：其实际上是一种经注册的标志或“商业外观”，以此向消费者表明该产品是由某一特定厂家生产或提供的。

商标的最初目的是为了保护消费者利益。在此之后，商标成为一种营销工具，辨识度极高的商标可能价值数十亿美元。

如同专利一样，只有中央政府机构才能颁发商标。你不能仅仅注册一个看似很酷的标志作为商标，注册商标的商品必须用于商业销售。如果商标注册5年（依不同国家规定而有所区别）仍然没有销售注册商品的话，该商标注册将失效，其他人可以使用该商标。

著作权

专利保护的是有使用价值的发明，商标针对的是商业性的活动。与此相对照，著作权主要适用于具有创造性的作品。

著作权的关键是艺术作品要具有表现力，而非使用性或实用性。律师兼3D打印专家迈克尔·温伯格解释称：“‘制作东西’本身是不能被授予著作权的。实用性的范围更广。举例来说，衣服是有用的东西，你可以享有一件衣服版式的著作权，但你不能享有‘剪裁’本身的著作权。”

与专利一样，著作权赋予原始著作权人在一定期限内排他性的权利（具体期限因国家不同而有不同的规定，但比较典型的是著作权人终生及其去世后70年）。他人或其他公司要复制、修改、销售、租赁、展览、公开表演该作品必须征得著作权人的许可。如果是“合理使用”该作

品，比如仅在教室用作教学研究，则不必征得著作权人的许可。

与专利不同，著作权的获得不需要向中央政府机构提交正式申请。作品一旦以某种形式固定下来，著作权就自动产生。中央政府提供的是正式的著作权登记。虽然一旦发生法律争议，经登记的著作权可以成为优先权和所有权的有力证明，但登记本身并非是必需的。

著作权人可以通过起诉侵权嫌疑人保护其著作权。然而，在提起法律诉讼之前，著作权人必须首先要求侵权嫌疑人停止侵权行为，这被称为“停止侵权通知”。如果侵权嫌疑人此前没有意识到侵犯了他人著作权，接到通知后迅速地停止侵权行为，那就不会再有麻烦。问题是许多侵权嫌疑人虽然实际上并没有侵犯别人的著作权，但大多数人不愿意到法院界定是否侵权。

我们预测将来著作权争议中最棘手的问题应该是“演绎作品”的著作权认定。根据著作权法，演绎作品是以另一作品为基础创作的作品。翻译是演绎作品，模仿流行歌曲也是演绎作品。

如果你将现存作品的设计文件进行改编，使其成为一个新作品，那什么情况下你是在创作演绎作品，什么情况下你又是在创作一个全新的作品呢（全新作品意味着你是著作权人）？又或者什么情况下你是在有意地巧取豪夺他人的创造性劳动成果呢？

如果你浏览销售或交换3D打印产品及设计文件的网站，你可能会看到很多受著作权法保护的产品。享有著作权的大公司没有对小设计师和3D打印爱好者提起法律诉讼并不是因为他们很仁慈，而主要是出于成本的考虑。违反著作权的3D打印产品并未大量销售，因而尚未触及全球玩具公司或消费品公司的警铃。

专利

“专利”一词来源于拉丁语的“patere”，意为“公开”。常见的误解是授予专利意味着专利人可以将其创意视为秘密，事实恰恰相反，当发明人获得一项发明的专利授权后，一国的专利机关将公开此专利的必要信息，以使擅长该领域的普通人员依照公开信息也能制造出同样的产品。

政府设立中央专利局的原因之一就是要鼓励发明者公开其专利信息。根据维基百科，专利是“政府授予发明人的有限财产权利，以此换取专利人与公众分享其专利信息。如同其他财产权利一样，专利权可以被销售、许可、抵押、委托、转让以及放弃”。

专利与商业秘密的法律含义有很大区别。商业秘密是指发明人通过采取保密措施阻止竞争对手知悉其独有的产品制造方法。商业秘密不会公开，也没有正式的国家规定的保护期限，因而也不存在权利到期的问

题。

要获得专利，发明必须具有新颖性和实用性，而且不能是显而易见的方法、机器、制造产品或物质组合。在美国，专利期限从向专利局提交申请日起共20年。专利局一旦颁发一项专利，就授予专利权人排除他人实施本发明的权利。发明人要向一国的专利管理机构申请专利，在美国是美国专利局负责专利的申请和颁发。专利申请人可以一人、多人、单个公司和几家公司。

执行专利权的唯一方式是诉诸法律。如果你认为其他公司未经你的授权，擅自使用你的专利技术的话，你可以将其诉至法院。在法庭上要想理清思路可不是一件容易的事情。一项技术（以手机为例）可能包含上千项专利，这些专利的专利权人可能上百人。

3D打印面临的问题是其不能笼统地归于前述任何一类当中。如果一项产品技术没有申请专利，也就不存在侵犯专利权的问题；如果在3D打印产品上面没有注册商标，也不存在侵犯商标权的问题；如果一件有形物体具备实用性，也就不在著作权的约束范围之内。

数字版权

知识产权法很难执行，尤其当全球数十亿人正在兴致勃勃地制作复制品并与其朋友进行分享的时候。真正诉诸法律的争议尚未形成规模，试图通过法院来执行其知识产权的大型传媒集团吃了败仗。正如麻省理工学院教授尼尔·格尔圣菲尔德所言：“你不可能起诉全人类。”

鉴于法律诉讼的高成本、低效率（尤其是针对消费者的），大公司捍卫其市场地位的惯用策略是设置技术壁垒或DRM（数字版权管理）。比如苹果公司将DRM应用于其iTunes（一款数字媒体播放应用程序），以此阻止消费者复制超过一定数量的文件。消费者“越狱”之后能够免费下载文件就是因为“越狱”移除了DRM。正是因为存在DRM，iBook（一款电子书阅读应用程序）里面下载的书籍才不能复制给其他读者。

目前市面上销售的设计软件和3D打印机上不包含正式的数字版权管理系统。2012年，一家知识产权风险投资中介公司获得了一项编号为#8 286 236的专利，该专利被用于在机器（包括3D打印机）上进行数字版权管理。简单地说就是设计程序中包含DRM技术，3D打印机在读取DRM设计文件之后会拒绝打印，这类似于软件应用程序在产品密钥过期后停止响应。

DRM技术可能无法扭转大的发展趋势，只能是促使消费者和企业之间展开军备竞赛。随着3D打印技术的发展，另一复杂现象将出现，人

们在扫描了享有专利权或著作权的产品之后，这些产品未能被植入的DRM系统捕捉到。正如西蒙·布拉德肖、阿德里安·鲍耶和帕特里克·豪福所指出的："问题的关键是逆向工程设计的共享（这看上去是合法的），而非原始设计文件的共享。"

另一个类似于DRM的尝试可能会是FSF（自由软件基金会）推行的认证项目，名为"RYF"（尊重你的自由）。FSF对硬件供应商进行认证，认证标准是能够给用户带来自由，并能控制产品和盗版。在其网站上，自由软件基金会描述了其针对RFY硬件程序的标准："作为公民和消费者，我们需要提升我们对新一代硬件的需求，即支持该硬件是因为其能够尊重自由。"基金会做出的第一份认证是阿利法制造公司（Aleph Objects, Inc.）所出售的LulzBot （打印机名称，字面意思为搞笑机器人）3D打印机。

最近我注意到，许多调查显示音乐盗版率终于开始下降。人们不会因为害怕法律报复而停止复制音乐文件，相反，是因为音乐公司开始侧重于在线销售音乐制品，从而使得歌迷心甘情愿地为音乐付费。新专辑迅速而毫无延迟地以数字的形式公开发行，在线商店以用户为中心，下载和支付也更加便捷。

难道知识产权和专利保护过时了

为何公司愿意花费巨额法律费用阻止竞争对手和消费者复制其产品呢？通常的解释是：拥有制造或销售某一产品或品牌的排他性独占权利是获取利润的关键。这个观念可谓根深蒂固，知识产权的坚决捍卫者认为，严格的执行和知识产权保护是构建强大且颇具创新力的经济社会的基石。

但现实情况并非这么简单，每一行业和产品都在不同程度上获益，换句话说，知识产权并非总是获取利润的必备要素。事实上，有些人认为专利和著作权阻碍了思想的自由流动，而思想自由流动才是促进创新发展和繁荣的有力要素。

RepRap打印机：改变商业模式

为了了解更多关于3D打印的知识，并从另一个角度思考知识产权的问题，我们前往英格兰西南部高大起伏的山丘访问了3D打印界最有影响力的专业人士—阿德里安·鲍耶，他是标志性的RepRap（为英文"快速复制原型"的缩写）打印机的创造者。"在某些情况下，专利毫无疑问抑制了发展。"阿德里安说，"专利的本质就是让持有人独享20年的垄断。"

"詹姆斯·瓦特给蒸汽机里各种关键部件申请了专利。然而，你看，

在瓦特拥有蒸汽机的20年专利期里，没有什么重大的创新发生。”他补充说，“当瓦特拥有的蒸汽机专利过期后，蒸汽机的创新如火花般爆发，随后发生了工业革命。”

当阿德里安和他的学生在2004年创造了RepRap打印机，他们当时并不知道它将成为一个改变游戏规则的技术和知识产权的实验。RepRap项目诞生于巴斯大学，巴斯这座古城位于作家简·奥斯丁的故居附近。建立于罗马时代的古老的石拱门环绕城市，修缮的庄园房子点缀在郁郁葱葱起伏的山丘上。

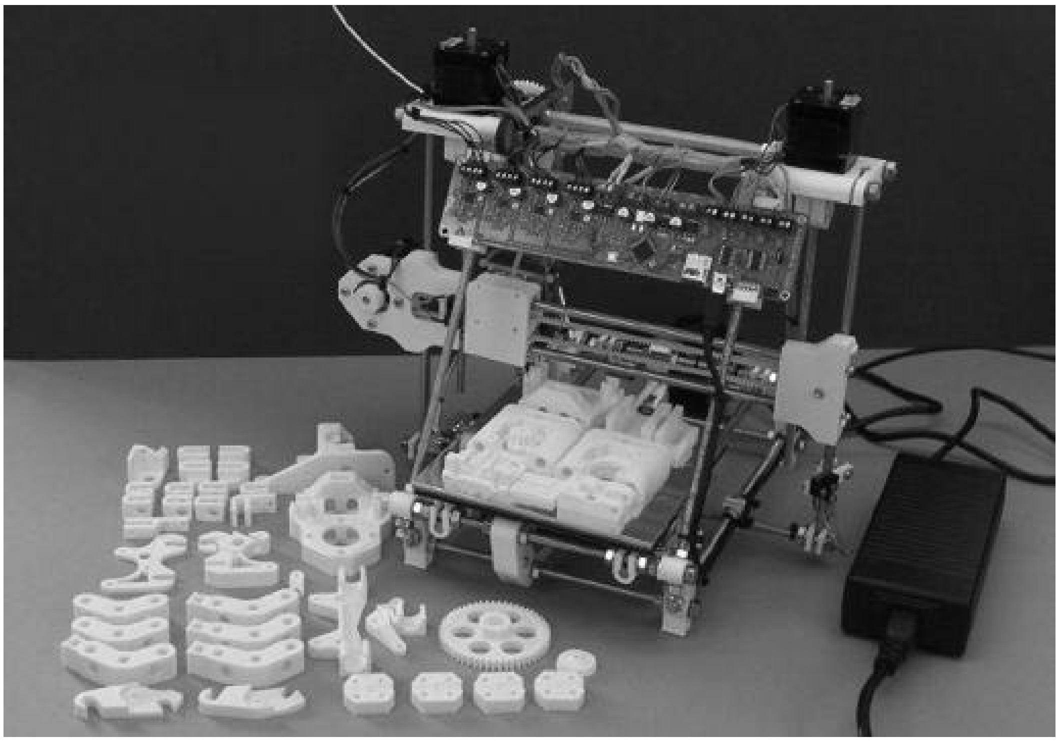


图12–2

注：RepRap开源的3D打印机可以制造大部分的非标准零件，它促进了自身的复制，并对现行的知识产权范式提出了挑战。

图片来源：Adrian Bowyer and the RepRap project

在这些古老的奇迹中，RepRap打印机作为一种破坏性现代产品开发模式出现在我们的生活中。从一开始，RepRap打印机因其两个特性而与众不同：第一，阿德里安决定使用开源软件许可在网络上自由共享打印机的设计图，他没有为RepRap打印机设计和打印技术申请专利；第二，RepRap打印机在设计时考虑了一个不寻常的经营策略—用户不应该也不必购买另一个型号的RepRap打印机。

阿德里安长期的愿景是每个RepRap打印机均可制造自己的更换零件。这样，备用零件可以打印出来，无须购买。如果用户想拥有一台新

的RepRap打印机（或1 000台新的RepRap打印机），他只需用RepRap打印机3D打印它的零件并自行组装。像繁殖兔群一样，RepRap打印机可以以指数速率复制出来。

机器自我复制的概念使人联想到著名的埃舍尔版画，它描绘了一个人画人、人画人画人、人画人画人画人……的现象，直到人物太小我们无法看清为止。大多数的机器，甚至那些设计图是开源的机器，都不能够制作自己的部件。RepRap打印机是一个迭代和无尽的计算机算法的物理版。

这可能会导致一些商业模式的瓦解。如果机器能够自行更换部件，对公司来说，想要申请和执行专利权将异常困难。另一种广泛使用的商业策略—到期报废，也行不通。一些行业受益于产品的快速更新，但这只适用于在恰当的时候。在这些情况下，工程师会自行测算如何做出最好的设计并把产品制作出来，产品的寿命也合适，能够过保修期，但又不会超出太长时间。产品保修期满后，也就报废了，也不是不可能。

当我们请教阿德里安对专利的看法时，阿德里安说："许多从事所谓的传统业务的人似乎很难理解的事情是，你运营一家公司专门出售数据全部公开的产品，却还能够赚钱。他们会说：'你不拥有任何知识产权，怎么能够赚钱？'"他回答了这个问题："你必须找到一个方法增加价值。"

RepRap项目并不是要违背商业化。当谈到自由共享机器设计的影响时，阿德里安明确表示，专利和著作权应该只是简单的几个选项之一。事实上，在写这篇文章的时候，阿德里安正处于他在巴斯大学最后的任期，并计划在离校后创立一家新公司，专门销售RepRap打印机的服务。

他解释说："由于你放弃知识产权，那就不能通过开公司来赚钱，这显然是废话。你所要做的是为产品增加价值。"阿德里安对知识产权的态度很简单：如果没有人受益于知识产权法律，那么需要改变的就应该是法律。

由于没有专利保护，RepRap 和 Fab@Home打印机的用户对于他们发明创造的机器功能改良部分，例如一个使洗碗机更安全的特殊打印头，可以随意申请专利。阿德里安指出，通过起诉客户保护自己的商业模式是粗暴和无效的做法。"RepRap打印机的设计、软件或电子元件的任何发展或改进，都产生于用户的主动创新。不会有任何中央机构发出指示：在设计的改进过程中，RepRap打印机用户自己花时间创造、自己进行思考。如果他们激发了其他用户，就可以组队共同努力。"

在某种意义上，RepRap打印机是用户主导设计和生产的体现。与

Fab@Home打印机一样，RepRap打印机的设计图是开源的。就像开源软件代码，制造RepRap或Fab@Home的产品说明可以在网上免费得到，用户无须支付费用或获得版权许可。

从RepRap 和 Fab@Home的产品设计元素可以看出，新的商业模式正在构建。MakerBot公司的“复制器1号”—市场上最流行的消费类3D打印机，则是这一模式的典型代表。今天，RepRap和Fab@Home打印机遍布世界各地，有的基于原来的设计图，有的则进行了设计改良。

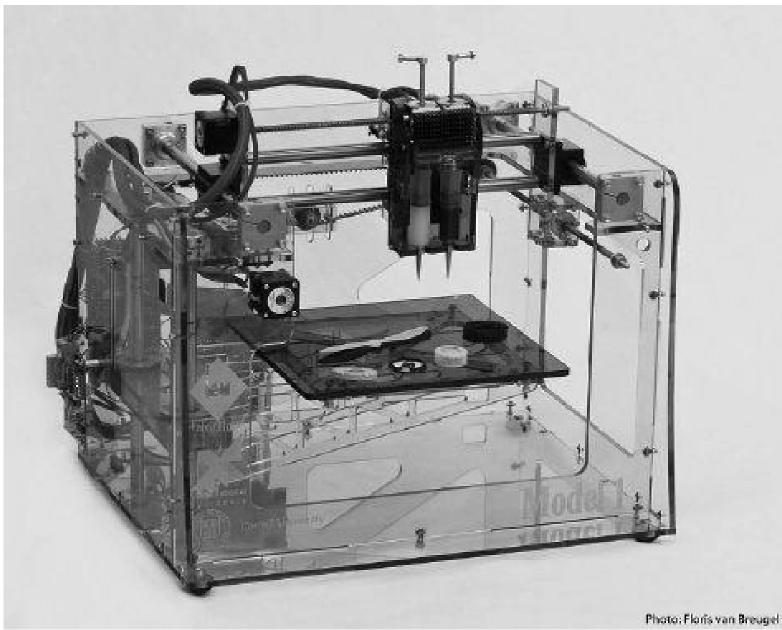


图12–3　Fab@Home开源3D打印机项目（2006年）

图片来源：the Fab@Home team. Photo: Floris van Breugel

如果这些开源打印机对商业类打印机产生了影响，那么这些商业打印技术对RepRap和Fab@Home打印机的影响就很值得一提了。然而，那些持有专利的商业类3D打印机公司在RepRap的设计侵权时，却从未试图阻止RepRap项目（至少据我们目前所知是这样），也许是因为RepRap项目不涉及3D打印机直接制造和销售设计—只是公开共享机器的设计而已。也许是因为那些3D打印机企业认识到RepRap项目产生的正面宣传效果将提高整个3D打印行业的知名度，或者是因为那些公司认为，如果学生在学校使用RepRap打印机，那么等他们毕业、找到工作，最后在工作中他们也会接受和使用高端商业类3D打印机。

回避了知识产权和机器设计与生产的控制，那RepRap打印机有什么方法从事传统观念的业务？阿德里安认为，当物质商品变得更容易制造、获取方式更广泛时，“在新领域的创造将是独一无二的”。当物理产品越容易复制，就有更多的人想拥有其他人没有的东西。

如果独一无二成为新的竞争优势，其结果将是在消费者和公司之间

出现独创性的竞赛。一方面，设计工具和3D打印使创造独特和定制的商品更加容易；另一方面，具有讽刺意味的是，这些工具使一个独特的产品更加容易被复制和改进。

在我们和阿德里安的谈话中，他说道："当新的创意出现时，或旧观念（这个观念以前非常昂贵，但现在由于技术革命而变得非常便宜）花费不多即可实现时，由于现在通信技术的发达，新的创意便会充斥世界。"换句话说，当每个人都可以制作几乎任何东西时，知识产权法则成为控制创意传播的一种拙劣的工具。

在某种程度上，一旦逆向工程和复制物体变得更容易，知识产权法律对于试图维持一个利基市场的生意来说就变得更加重要。然而，知识产权执法由法律或DRM技术来实施并不总是有效的。阿德里安总结说："专利法必须把对经济的影响控制到最小。政治家利用知识产权法试图控制经济，就像试图用胶质杠杆控制机器一样。"

开源硬件：**21**世纪的专利制度

RepRap和Fab@Home项目是机械设计硬件技术自由分享的最佳案例。尽管人数不多，但是处于逐年增长趋势的一群发明家正公开他们硬件设计的源代码，将其在有限使用条件下自由释放。与开源软件的信条类似，开源硬件运动是对现行的知识产权法律的局限性的反应。

在写作本书时，开源硬件许可仍处于婴儿期。随着时间的推移，许可的数量和品种可能会激增。类似于开源软件许可，开源硬件许可让一个发明家可以使用和修改另一个发明家的设计，一些许可还允许对改进的设计进行商用。

开源硬件的一个目标是创造一个充满活力的、专业的商业生态系统，通过有组织的方式在机器设计方面可自由和安全地共享。许多开源硬件许可模式的支持者都是自己开公司或在公司上班，对许多人来说，他们的利润在于改进开源代码的设计或改善提供的服务。

多年来软件产业已在商业软件和开源软件之间成功取得平衡。开源软件许可给计算机黑客、研发人员和企业提供了广泛认可、明确的替代品代替专利、版权和传统的商业许可证。事实上，许多软件工具包括一系列自助餐式的开源软件许可。

相反，硬件设计师的选择有限，专利被广泛接受。然而，并不是所有设计电路板或机器的发明者和小企业在处理专利问题时都会要求经济赔偿或付诸法律，他们也不想阻止他人使用其发明的合法权利。

如果投资者选择开源电子硬件设计，他们就会公开提供所有的图纸（或详细描述所需配件和软件、图纸和"板"文件），而这些图纸基本上

包括重新创建相同的产品或物体所需要的所有信息。在许可接受的使用规则下，发布的信息是可用的。

如果发明者愿意的话，开源硬件将成为一个非正式的思潮。一旦设计图是开源的，它就成为所谓的“现有技术”。现有技术，或先前发表的有关发明的技术资料，使得非发明人难以获得创意的所有权并为此申请专利。

由开源硬件运动定义的许可仍然处于起步阶段，不像开源软件运动那样成熟。然而，多亏一个群体的热情付出及两位年轻女士（艾丽西亚·吉布和阿雅·比德尔）的坚韧与远见，开源硬件的使用越来越多。在一个很大程度上是由男人主导的群体中，艾丽西亚和阿雅作为领导者、技术专家和企业家脱颖而出。

在《爱上制作》杂志的采访中，艾丽西亚把开源硬件描述为技术创新的催化剂：

> 我认为开源硬件相当于21世纪的专利制度。开源硬件不仅是开源创新，也是创新民主化。开源硬件不会有20年的专有权。它的好处是，整个群体为你的设计和创新做贡献，并分享各自的衍生产品。它促使原先的设计者创造一个更好的产品并不断完善，而不是把它锁在一个20年的僵局里。

开源硬件可能不适用于所有的发明。开源的理念对那些较为复杂的产品是有用的，如软件和电子，这些产品即使源代码公开，原创者的专业知识仍然有用。相对较少的人能改进别人的复杂电路或计算程序，因此原来的设计师通常仍然对这一项目享有控制权，即使它的源代码被公开。

但是，如果发明太简单，则容易被复制，发明者也很容易被遗忘。如果不需要相关专家提供支持，则该产品的发明者很可能无法从增值中受益。对那些“看起来容易”的简单、精致的发明来说，尤其如此。我想这是否就是一些开源许可最坚定的倡导者是软件开发人员和那些复杂电子设备的创造者的原因，而那些发明一种材料的新配方或一个新的机械装置的人通常还得继续依靠专利。

微专利

随着3D打印技术的发展，开源硬件许可是知识产权法和数字版权管理的一个很好的选择。另一种选择是改变现行的知识产权法律体系，使其更偏向于小企业和个人发明家。正如小额贷款在低收入国家发挥的作用一样（小额贷款让低收入人群有机会创立一家小公司），在新产品的开发上，微专利能使大企业和小公司在专利领域更平等。

类似于普通的实用专利或设计专利，微专利将由政府专利办公室正

式颁发。一个微专利将是一个很小的知识产权“单位”，而不是一个完整的专利，因此申请费用低廉、颁发速度也更快。专利办公室认定微专利时，也可以强制限制专利的适用范围。

让我们看看微专利如何发挥作用。发明人花费数百美元向中央政府微专利库提交文档，对发明做了详细的描述，提交的文档将盖上时间戳并立即公开发布。微专利的有效期可能将缩短至5年，而不是20年。像商标一样，微专利只是保护商业销售的商品，防止其被盗用。与专利一样，微专利也包括功能申请。与著作权一样，申请微专利很容易且手续简单。

有些人认为，大量的微专利会导致专利泛滥和知识产权学界的分裂，但5年期限将避免这种情况发生。事实上，微专利狭窄的适用领域将使其他发明家更容易从事平行发明。微专利必须商用以确保有效，这样公司很难通过微专利阻止竞争对手。

事实上，微专利会提高法律处理和实际应用之间的比率。毕竟，评估和获得专利需要投入很大的工作，然而大多数颁发的实用专利很少在商业上使用。此外，只有约1‰的专利会遇到诉讼纠纷和审理，在遇到诉讼纠纷和审理的案例中，有一半的诉讼无效。

相反，如果专利的范围很窄，并能够快速地廉价获得，这种做法就淡化了专利的诉讼过程，而强调知识产权保护的实际商业价值。一旦被授予微专利，发明者将立即被授予一个明确但短期的独家权利。只有当两个执业商业实体对专利有争议时，才从创新、实用和创造性等传统维度评估专利侵权指控。

3D打印迫切需要法律保护

所有这一切将发展到何处？如果事实比小说还离奇，也许通过科幻小说看未来世界是个不错的选择。

科幻作家科利·多克托罗的小说《创客》描绘了一个3D打印机已经普及的引人入胜的未来世界。《创客》描绘的世界正是经济困难时期，失业率很高，大量的人口贫困潦倒并生活在自己搭建的棚户区。

故事一开始就讲述了两个主人公佩里和莱斯特鼓励小规模经济革命，他们教当地人设计、3D打印并出售自己的商品。起初一切都很正常，随着经济边缘化的人们学习设计和3D打印产品，工作机会在全国各地和世界大规模涌现。人们获得了工作，恢复了他们的自尊。

随着故事的继续，企业家靠出售一些粗糙的3D打印定制赝品为生。已破产的沃尔玛的巨大停车场被跳蚤市场占据，企业家随意叫卖打印的烟枪、单发拉链枪和有图案的隐形眼镜。青年卖主出售名为“bio”（生

物）的3D打印的生物怪玩意儿，例如，由胚胎干细胞培养成的毛球、骨头和皮肤而制成的手镯。在这个未来世界，另一个典型的引人入胜的生物打印物体是用质地细腻的皮革打印出的人造玫瑰，而这些皮革是用人工培养的胎儿皮肤制成的。

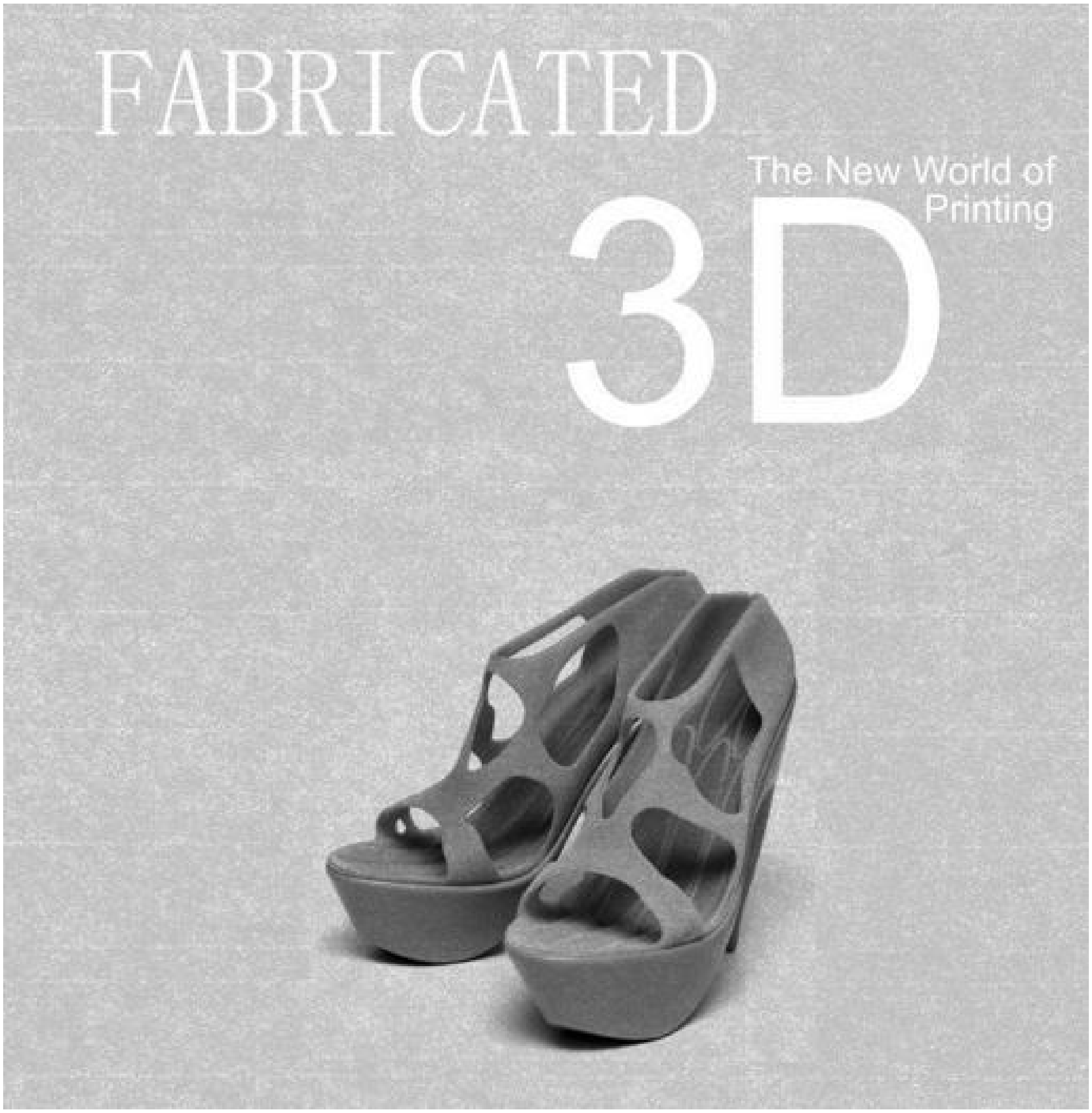
在这本书的后半部分，出现了经济反乌托邦。企业的快速伪造使得3D打印经济崩溃了。低成本的3D打印复制品削弱市场之前，新产品有一个逐渐变小的短暂的盈利周期。迪士尼公司寻找新的盈利点，启动了一系列知识产权侵权诉讼，这严重削弱了仅存的经济活力。

《创客》提出了可能已不太遥远的未来世界里的法律问题。从一个角度看，生产权力民主化的好处是人们获得了个人权益。广泛使用的生产工具的缺点是经济崩溃，猖獗的伪造降低了利润。在一个任何人都能3D打印任何物体复制品的年代，试图对个人思想进行保护的不切实际的知识产权法律给我们带来了毁灭性影响，这也使得上述法律问题更加明显。

解决方案是创建切合实际的平衡的法律框架。一篇关于纳米技术中心分子制造的文章指出：“有些风险源于管理太少，有些源于管理过多。不同的领域使用不同的管理很有必要。对任何一个风险的极端或本能反应都会为其他风险提供肥沃的土壤。”

3D打印引入的法律挑战在公共意识边缘闪现。我们刚刚开始探索这一前沿领域，不久的将来3D打印的有关法律将会产生。

第13章　用3D打印设计你的未来



描述3D打印技术潜力的一种比较流行的方式是把它比作最强大的制造机，类似于《星际迷航》中的“复制器”。“复制器”可以执行口头命令并满足“进取号”船员的任何要求。换句话说，它可以做任何事情。

格雷伯爵茶

我小时候就看了《星际迷航》，当时从没有人对“复制器”进行试验，这令我很沮丧。在每集中只要“复制器”一出现，每个人要的都是一杯格雷伯爵茶。某一天，一名机组成员想要一块芝士蛋糕。由于出生在瓦肯星，斯波克缺乏想象力或许可以原谅，但他的人类同事缺乏想象力就不能原谅了。

长大以后，我把这一点归咎于《星际迷航》的编剧。一台机器可以做任何事情，但他们的想象力仅仅是利用这个奇妙的“复制器”提供一杯普通的茶。在我的实验中，这种现象被称作“格雷伯爵综合征”。

3D打印技术的设计深受格雷伯爵综合征的影响。如同“复制器”未被使用的能力，3D打印技术为我们提供了一个新的未被探索的设计空间。然而，我们的想象力却受到了经验的束缚。人类是习惯性动物，我们的创作都是基于已经熟悉的事物。就像那句老话所说：“如果你只有一把锤子，那么所有东西看起来都像钉子。”

其中一个问题在于我们必须借助设计软件。计算机辅助设计工具在3D打印过程中至关重要，但设计软件仍然受到计算能力不足的限制。此外，目前的设计工具利用传统的制造机器生产，面临诸多物理限制。

为了摆脱格雷伯爵综合征并充分利用3D打印技术，我们需要更加努力以超越《星际迷航》的编剧。言归正传，回到现实中，我看到格雷伯爵综合征在教室里上演，它根深蒂固。

我教授本科生产品设计课程。在一节课的开始，我让学生设计一个既实用又好看的笔筒。我解释说这次的笔筒设计是3D打印的，所以我花时间教他们新的设计技术。

布置笔筒项目时，我鼓励学生自由大胆地设计，越新奇越好。“要真正地摆脱条条框框的束缚！”我告诉他们，我希望能看到一些新颖、前卫的设计。

布置完这个任务后，学生们带着完成的设计作品返回课堂。当我走在房间里浏览他们的计算机屏幕时，我的希望破灭了。他们的笔筒大多是经过精心设计的，它们可以保持直立，大部分笔筒可以存放铅笔和钢笔。事实上，大多数学生的设计良好、结实，这些设计会最终成为合乎情理的、足够好的笔筒。

有几个人大胆地设计了一些花样使笔筒看起来更加生动，然而提交的大部分设计都很传统、缺乏变化。并不是只有工程专业的本科生才受格雷伯爵综合征的影响。在学校之外，我注意到即使是专业的设计人员也经常放弃3D打印所带来的创作自由。

马歇尔·麦克卢汉是加拿大哲学家和作家，他用一句名言恰当地描述这一现状：“我们打造了工具，而工具也会反过来塑造我们。”马歇尔敏锐的洞察力有助于解释以格雷伯爵综合征为特征的设计短视。几十年前，我们打造了计算机辅助设计工具使得生产上受到的限制不复存在。然而，今天这些设计工具继续塑造我们。为了打破这种僵局，我们必须重新打造设计工具。

我发现两个机会特别有前途：首先，将设计软件打造得很直观而且

使用起来也很有趣；其次，提高计算机关于形状的“思考”方式，因为计算机关于形状的控制在很大程度上决定了它们能够引领我们探索多远。

史蒂夫·乔布斯：“计算机是我们大脑中的自行车”

在1990年的公共电视台采访中，史蒂夫·乔布斯把计算机描述为“我们能够想出来的最了不起的工具。这相当于我们大脑的自行车”。他的观点是，只要给人类的基本能力提供适当的技术支持，人类就可以极大地扩展自身的能力范围。不幸的是，对于大多数人来说，设计软件尚未成为我们头脑的自行车。

试想一下这样的场景：一个9岁的女孩在空中打手势，在旁边的屏幕上，一个设计正慢慢形成。女孩的手指上粘贴着带有传感器的小贴纸，这些传感器以无线方式将信息传递给设计软件。该软件可以接收传感器的数据，并不使用键盘或鼠标就将女孩消除、选择及合成屏幕上物体的动作解读成正确的形式。计算机能够理解她的意图，就像一个能工巧匠一样，把设计最终变成完美的形式。

要是设计软件使用起来这么容易该多好。为了充分展示3D打印技术的力量，设计工具必须更加直观易学，使用起来更有趣，功能更强大。一个有效的方法是将设计软计的外观和操作制作得更像一个视频游戏。

3D打印视觉设计：从游戏中获得灵感

几个月前，我收到一封来自埃里克·海恩斯的邮件。埃里克·海恩斯是一个经验丰富的软件开发人员，硕士专业是计算机制图，并且在欧特克公司供职很长时间。埃里克认为我可能会对网络游戏《我的世界》感兴趣。“你可以将《我的世界》描述成未来的8位3D打印视觉设计。”埃里克告诉我，“数以百万计的人玩《我的世界》，这是成人的积木玩具。”

埃里克之所以联系我是因为他认为我可能会对他开发的一个软件工具Mineways（一个可以将设计3D打印出来的软件）感兴趣。

Mineways是一个开源软件工具，人们通过这个工具能够进行编辑，然后3D打印出他们所设计的物件。当埃里克意识到人们在网络上构建的丰富的虚拟世界正开始以实物形式展现时，他研发出了Mineways。埃里克利用业余时间花了45天编写出Mineways，并于2011年圣诞节对外推出该软件。从那时算起，Mineways下载量已经超过50 000次。

为了了解更多信息，我去见了埃里克，让他给我展示《我的世界》。在埃里克的客厅里，首先引起我注意的是分散在各处的3D打印的小玩意。他向我展示了一个3D打印的城堡复制品，还有一个斑驳粗糙带有黄色茅草屋顶的灰色石头房子。埃里克解释说，这所房子是《我的世界》里一个村庄的复制品。

我们俩坐在宽屏计算机显示器前，埃里克登录了他的《我的世界》账户。他解释说，《我的世界》是一个多人游戏，在游戏里玩家设置一个头像并建立自己定制设计的虚拟世界。玩家通过点击和拖放立方体原料块营造出精致和丰富的幻想世界。在写作本书时，《我的世界》估计拥有800万活跃玩家，这相当于欧洲一个小国家的人口规模。

我盯着屏幕，埃里克带我走进了他的虚拟世界—Vokselia。“最初，你会拥有一个账号和一个世界，那个世界里什么都没有。”他的游戏界面有与几个朋友共享的房屋、城堡、巨大的玻璃穹顶，甚至还有一些农场动物。埃里克向我展示了一个富有野心的设计—棱角分明的蚂蚱。他解释说，将蚂蚱细长的腿和触角设计成能够用3D技术打印出来是一个挑战。

在这个游戏世界里，每个立方体建筑块代表着真实世界里1立方米的体积。与经过精细雕琢看起来像电影的现代视频游戏不同，《我的世界》里的图形乍看之下很粗糙，甚至有些原始。在《我的世界》里，世界由大块状的原料组成，树木、房屋、湖泊和结构都被粗糙地像素化了，每个平坦的表面看起来都是由个性化的瓦片组成的。

是什么使得《我的世界》这个游戏如此有吸引力？部分来自于神奇的视觉效果，立方体形状的积木使得人们建造的城市、建筑和幻想的世界充满神秘氛围。埃里克说：“在视频游戏里，图形质量可能很高，但你不能改变和移动东西。大多数视频游戏是互动的，但在那些游戏里你不能达到这样的设计水平。”

在这个幻想世界里有严格统一的内部规则，玩家必须遵守物理定律，所以他们的设计空间融合了幻想与物理世界的规律。玩家必须受到相同的约束，将现实世界的复杂性引入建造过程中。由于一个精心设计的项目可能需要花费大量时间，为了加速游戏过程，《我的世界》里的一天实际仅相当于20分钟。

埃里克向我展示了一个火车站的地砖—棕色、红色和黄色组成的马赛克。制作棕色瓷砖时，《我的世界》的玩家不能仅仅选择“棕色”并把它应用到一块砖上。相反，制作棕色瓷砖是一个系统而又艰苦的过程。“这些瓷砖的颜色来源于羊毛的特殊染色，你必须剪羊毛和收集羊毛以获取这些颜色。”埃里克说，“粉红色和棕色都相当罕见，你必须找到可可豆色的羊毛来制作棕色的瓷砖。

我猜测《我的世界》的吸引力部分在于玩家能以团队形式展开大规模的建设项目，创建老式社区。埃里克和他的朋友们联合起来建立一个虚拟的杰作，名为社区火车站。这个火车站以伦敦的圣潘克拉斯火车站为原型。玩家们贡献时间、原材料或项目设计。当我看到社区火车站

时，在车站中庭的角落里有一棵闪闪发光的圣诞树，很明显玩家们在节日结束后没有将其拆除。

《我的世界》展示了一个新的设计范例：游戏化的计算机辅助设计。只需要27美元，《我的世界》的玩家就能拥有方便而功能强大的设计工具以及与其他玩家和建造者共享的网络社区。当我还是一个年轻工程师的时候，我学习使用设计软件几乎就像是学习如何管理一个机场控制塔。设计工具的用户界面非常复杂，简直令人困惑，词汇也非常特殊，并且远远超出了普通使用者的技能。任何年龄段的人在学习使用它的过程中都无法感受到乐趣。

《我的世界》非常容易操作，8岁的小孩都可以玩。事实上，在几个月前，我8岁的儿子就在家里开始玩了。经过几天的学习，他帮我设计和建造了我自己的虚拟家庭（在他的树和屋子附近），并配备了淋浴间和床。

《我的世界》似乎令我儿子非常着迷。他进行了几个实验来测试TNT炸药（一种威力较大的炸药）的爆炸力，泥土和崖面上出现大量带棱角的弹坑。儿子告诉我，碰巧在爆炸地区附近的几只鸡死了，但不知何故一头路过的牛却在爆炸中幸存下来，不久便在巨大的弹坑旁边安静地吃草了。

《我的世界》软件内部（除了一些计算机科学家以外其他人不会有什么兴趣）有一个有趣的设计架构，它的软件不使用行业标准的设计模型。《我的世界》里的块状图形不是由传统的实体建模（工程师首选的设计工具）生成，也不是表面网格（动画师和艺术家首选的设计工具）生成。《我的世界》的核心是一个名为体素的数字单元。在一个三维物体的体积内，一个数字化的体素顺利地转换为一个精确的物理位置。

基于体素的设计占用大量内存，但理论上它作为设计单元或数字砖吸引用户。据埃里克所说，体素虽然外观看似粗糙，但它向人们提供了一个简单的设计方式，这一点很有吸引力。他说："体素作为一个单元，人们可以很直接地与其发生联系。几十年来，我一直从事表面建模工作，也就是绘制多边形或曲面。但是，它有点儿模糊，有悖常理。如果你没有接受过培训，表面网格很难使用，没有人们想象的那么简单。"

埃里克向我展示了一个美丽的作品，这部作品刻画了一个西班牙城市的雄伟和壮丽。这个城市是名为立体角（Solid Angle）的图形设计公司的李·格里格斯和托马斯·费尔南德斯·塞拉诺设计建造的。在创造的世界中，他们设计了一个圆顶建筑，该建筑位于6个街道的环形交叉口中央。

圆顶建筑周围的模型城市布满了红瓦屋顶，远处有一个圆形剧场。

见图13–1，你可以看到这个场景的原始图像描绘了马里奥兄弟爬上一个建筑物的轮廓。然而，由于知识产权的原因，当该图像刊登在设计杂志封面上时，马里奥兄弟的形象被删除了。该杂志考虑到任天堂的版权问题，安全起见，要求格里格斯和塞拉诺将马里奥兄弟的形象从图片中删除。



图13–1

注：李·格里格斯和托马斯·费尔南德斯·塞拉诺创造的场景。如果你仔细看，在中央穹顶左边可以看到马里奥兄弟。

图片来源：Lee Griggs (Solid Angle SL) and Tomás Fernandez Serrano (forominecraft. com). Rendered with the Arnold globad illumination renderer.

如果20世纪80年代末我和我的同学学习使用计算机辅助设计时，教师告诉我们有一天我们的孩子将会愉快地玩简单的计算机辅助设计工具，我们会嘲笑他。那时我们没有能力用计算机运行一个细节丰富的虚拟世界，我们也没有可能获得一台3D打印机来完成设计。

物质编译器：让**3D**打印设计变得如此简单

如果你有一个改版的不只是简单服从口头命令的“复制品”，你会用它做什么？这台机器将会更智能。我将这个智能机器称为“超级智能设计助手”。告诉超级智能设计助手你试图解决的问题，而不是只告诉它一个你试图复制的已经存在的物体的名字。

这里有一个例子，如果你命令超级智能设计助手“为我的书架制造一个新支架”，你最好这样对它说：“我需要一个新的支架支撑一套书。”接下来告诉计算机这个书架应具备的功能，或提出有些人称之

为“设计规格”的设计要求。就像一个好的设计师，你的自动化超级智能设计助手会仔细聆听你的要求并针对任务提供一个优化的解决方案。

设计支架时你需要飞快地说出几个设计要求：“这个支架6英尺宽，能支撑比较重的课本，并靠着一面垂直的墙。此外，支架的重量要尽可能小但能负载至少50磅的重量。”最后，告诉你的设计助手你打算用硬塑料3D打印这个支架。你的设计助手会仔细思考，然后经过一番计算提供其建议的设计方案。

在我的实验室中，我们基于这个概念创造了一个软件工具。该工具通过运行算法从而计算出最优的3D打印支架设计。我们将按设计要求输入计算机并按“输入”键，结果让我们大吃一惊。

计算机为这个书架的支架提供了一个新颖的设计，这个设计看起来一点儿也不像你在当地家居用品商店里买到的那种直角支架，而是带着漂亮镂空的纤维团。我使用今天的软件设计工具不能完成这样一个有机形状的（最佳的）设计，考虑到计算机必须参考的重量和材料性能，我无法制造出这个支架。

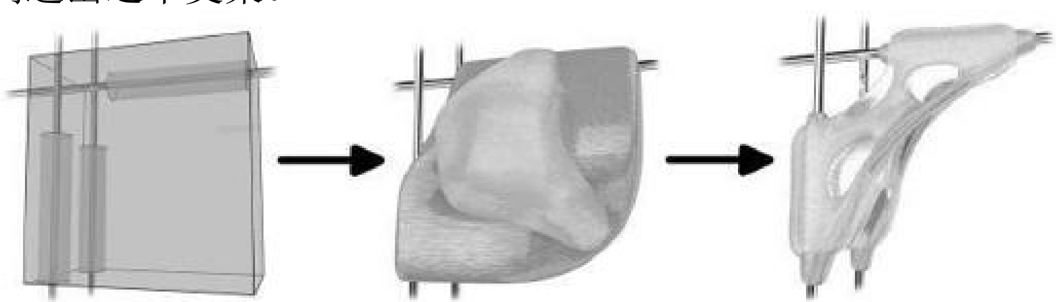


图13–2

注：未来，物质编译器将为给定的目标设计出最好的结构，然后3D打印它。从体积约束（左边）开始，编译器制作出一个最优的有三个杆子支撑的支架。

图片来源：Jonathan Hiller

当计算机学会消除人类的需要与多材料打印机功能之间的隔阂时，将会发生什么？结果将是下一代设计软件或者是我称为“物质编译器”的出现。

物质编译器这个术语最初由科幻作家尼尔·斯蒂芬森提出。在他的小说《钻石时代》（*The Diamond Age*）中，书中的人物讲述了他们的物质编译器会制造什么，他们会把物质编译器从机器中拖出来，不一会就制成一个塑料床垫、某种食物或一把枪。当然，斯蒂芬森的物质编译器不是3D打印机，它们是核心食物的原子重新组合后形成的“纳米装配”。像《星际迷航》中的Replicator一样，这些物质编辑器不能设计新的东

西，它们仅限于复制已经存在的东西。

物质编译器的发展前景在于将人工智能的力量与3D打印相结合。人工智能将利用算法将人类提供的高级要求自动“编译”到一个最佳设计中，适用于3D打印，3D打印机将设计变为现实。将两者结合在一起，物质编译器能够使我们设计出目前尚不存在的新事物。

也许我们将物质编译器比喻成传统的软件编译器更合适。为了更好地在计算机硬件上运行，软件编译器将高级计算机语言（如C++）转换成机器代码，然后由物理处理器执行这些代码。同样，物质编译器将高级需求转变为可以利用3D打印机最新材料和特性的设计文件，然后，3D打印机创建物质编译器生成的设计文件所描述的对象。

也许墙上支架不是最好的例子，它只是一个简单的设计，挑战性不大。如果你试图设计和制造一个复杂的机器，附属于3D打印机的物质编译器的作用就非常明显了。如果20年后有人邀请我为未来的火星任务设计一个机器人，我会按照下面的步骤来做。

首先描绘火星上独特的环境，其次给出一些总体指标，如机器人重量范围、使用材料，最后我将给出它的具体性能，如移动速度、稳定性和工作效率。然后，敲一下“回车”键，等待物质编译器生成设计方案。将来某一天，当物质编译器成为日常的设计工具时，那些因试验和错误而耗费大量时间的复杂设计项目将变得非常简单。

交互式设计：和计算机交流设计想法

尽管物质编译器很智能，但它不能读懂你的心思。诚然，物质编译器可以根据你的要求制定优秀的设计方案，但是它还不能和你进行思想交流。如果你和你的设计工具在迭代设计过程中能够交流并且一起工作，将会怎样呢？

如果一台计算机能够在快速迭代中迅速给出设计理念，你就可以从中做出较好的选择了。然后计算机“研究”你的设计建议后，快速做些调整再反馈给你。你可以再次选择自己想要的选项反馈给计算机。计算机会再次进行调整，并将结果返回给你。

在迭代设计过程中，人和计算机之间相互交换想法被称为交互式“进化设计”。就像生物进化一样，但速度比生物进化更快，计算机可以使用数学算法重新调整设计。交互式进化的美妙之处在于，用户不需要了解任何有关计算机进程的内部原理，也不需要知道如何使用设计软件或如何制作出最佳设计方案。实际上，在某种程度上这有点儿像艺术家在一个新项目开始前通过浏览网页获取灵感。互动式设计软件可以激发新的灵感，促使设计者勇于创造出别人没想过的设计方案。

在我的实验室，我们做了一个互动式设计软件的工作原型。这个软件是我以前的一个学生杰夫·克卢恩开发的。杰夫和他的团队将软件做成网页并将其命名为“无尽之形”（来自于达尔文生物进化过程中的描述）。

下面介绍无尽之形网是如何工作的。人们养狗前先让那些具备他们想要的幼犬特征的狗杂交。无尽之形网可使用户选择他们喜欢的狗进行育种设计。换句话说，无尽之形网为使用者和交互式设计软件间提供了快速反复的交流。

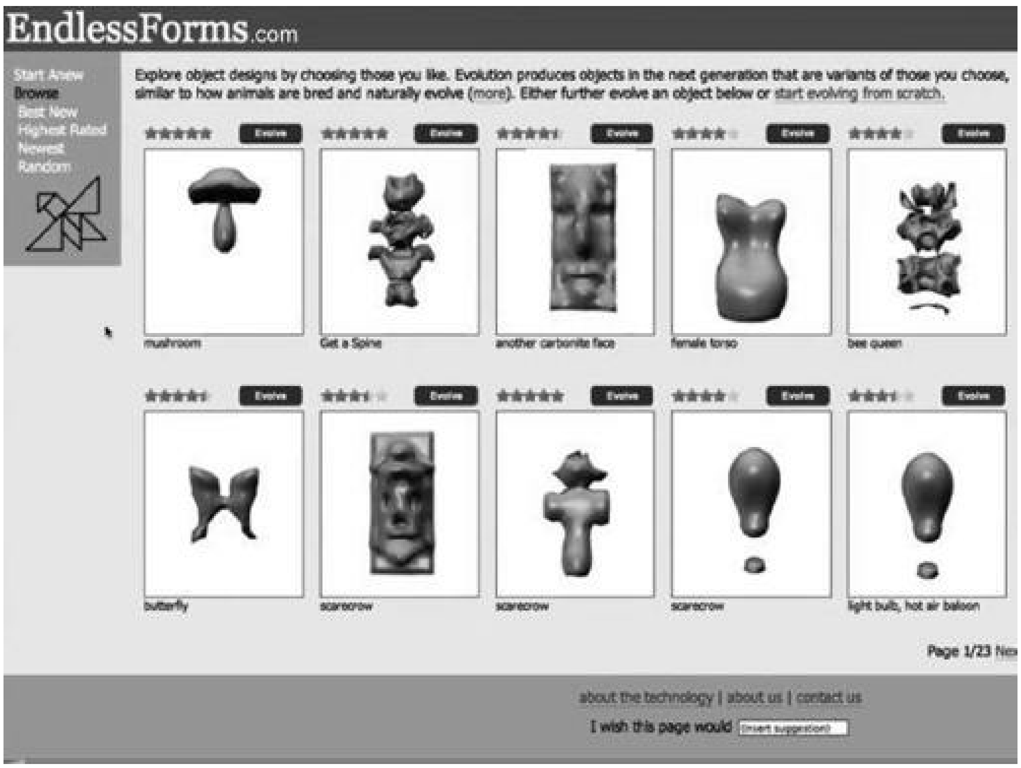


图13–3

注：无尽之形网让用户可以选择他们喜欢的设计，并反复优化设计。

图片来源：Jeff Clune and Jason Yosinski

假如让你设计一个香水瓶，你不知道如何使用设计软件，你也不愿意参照现有瓶子的扫描图案进行新设计，那么你可以坐下来进入无尽之形网，点击网页上变体集中的一个原始形状，做出初次设计选择。这时，无尽之形网将注意到你的第一次设计选择，“思考”并迅速进行一些计算。然后，它会产生几个新的形状，这些形状有点儿类似于你第一次的选择。

接下来，你会从这一组新的形状中再次选择。无尽之形网将重复这一过程：关注你的设计选择，产生一批新形状供你挑选。最后，在经过多次快速迭代和形状选择后，你会看到一个新的设计样式。当你觉得这

个设计正是你想要的设计时，保存最终设计，这时你的设计任务就完成了。

当杰夫和他的团队成立无尽之形网时，他们意识到他们可以亲眼看到人们的设计过程。给用户一个几乎空白的平面，他们做出一系列快速的选择后，有趣的设计就出现了。网站正式上线后，短短几个月内用户生成了超过300万个奇形怪状的物体，从蘑菇形状的灯罩、生育女神雕像到显示出幽灵般面孔的立方体。

当人们使用传统的设计工具时，界面和软件使人们通过自我意识塑造他们的想法。但无尽之形网用户可以通过不断点击他们喜欢的形状完成设计。快速选择然后坐下来等待的过程与计算机为用户做了大部分工作的事实使人们的潜意识似乎有了一个新的表现。

无尽之形网也许不是创建下一代火星探测器零件最好的设计工具。当用户带着冲动点击他们喜欢的形状进行方案设计时，设计结果可能不完美，也不具有最佳性能。作为一种新型的人机交互的早期原型，无尽之形网的价值就在于证明人机是可以进行合作设计的。

事实证明，让人们评价提供给他们的设计方案比让他们从头开始设计方案要容易得多。虽然你可能无法从头至尾设计一所房子，但是你很容易说出你喜欢或不喜欢一所房子。一个好的建筑师会听从你的意见和反馈，经过反复交流，设计出你喜欢的房子。人们饲养狗已有几百年的历史，却不懂动物遗传；农民在了解植物遗传学之前很早就培育出玉米了。我们也可以创造复杂的东西，而不需要了解它们是如何工作的。

无尽之形网展示了计算机和交互设计软件如何将一个新维度引入创造性工作中。计算机艺术先锋斯蒂芬·托德和威廉·莱瑟姆描述了一个以计算机为基础的艺术创作过程，包括两个阶段：创建和园艺。艺术家首先运用他选择的物理和生物规则，如光线、颜色、重力、成长和进化，以及他自己发明的其他规则创建虚拟世界系统。然后，艺术家在他创造的虚拟世界里变成园丁，像植物育种家培育花一样选择和培育雕塑样式。

形式语言：设计师与计算机无缝协同工作

3D打印设计中最大的挑战是如何使人类设计师和计算机创造性地、无缝地协同工作。一个相关但是可能被忽略的问题是，为了更好地发挥3D打印机的生产能力，计算机需要知道如何更好地设计形状。

人类用书面和口头语言从语法上分析、记录和思考现实，每种文化的语言都体现其价值和物理环境。熟练的演讲者会使用复杂的语法和丰富多彩的词汇。其他人说话时通常使用一串简单、松散的词汇，这些词

语缺乏组织，语法上也不怎么通顺。

设计软件不用语言，而是通过捕捉和追踪描述物体的数据分析和记录外部世界。这种以数字化形式描述物体的方式，专业术语称之为“几何描述”。

未来的设计软件就如同孩子学习语言一样，在描述形状方面将会变得越来越流畅。孩子学习语言的成功表现为他说话流利，并对周围环境做出恰当的反应。同样，设计工具能否有效改进取决于我们能否创造出针对当前设计问题能够快速准确地改进几何表达方式的软件。

一些人类语言有其他语言没有的表达情绪状态或特定情况的词汇，人类语言的复杂性和可供使用的词汇数量影响语言表达内容。同样，专业设计软件处理内部几何表示的方式决定了软件控制设计的好坏。

当前，大多数设计软件只能使用简单的语言形式，运作起来类似传统的蓝图纸，语言简单、粗糙，登不了大雅之堂。例如，设计软件用两个词表达设计中材料的存在和不存在，即“有”和“没有”，毫无歧义。它没有办法描述物体的成长、变化或有条件的适应。如同一个讲外语的人或孩子学习他的第一个词一样，设计软件只是简单直白地表达设计形状或材料的细节。

除非软件设计工具更有说服力，否则我们无法充分挖掘3D打印的潜力。计算机设计形状即有几种简单的方法也有非常复杂的方法。如果必须对设计范例从最简单到最流畅和适用性最强进行排名，排名如下。

首先，最简单的几何表示是传统的纸质蓝图、表面网格模型或固体的几何形状。这些设计符号描述的是简单的固定形状，相当于语言中一些简单的描述性词语。

其次，适用性较强的是那些能够处理参数设计的软件。这些软件使用户能够定义随参数调整的通用几何形状。例如，类似锤子的形状都可以用一个几何形状来描绘，只是几何形状中把手的长度和宽度不同而已。

在这一点上，我们进入了未来的世界。以下几种设计语言具有高度实验性，大部分是在实验室和尖端设计实验中使用。在一种所谓的“编程式设计”的方法中，计算机把形状描述成一系列有特定顺序的步骤，有点儿像按照食谱而不是最终的外观描述蛋糕。

再次，就是一个比较复杂的方法，被称为“生长式系统”。按字面意思，这种系统就是按照一套既定的规则从一颗种子“长成”形状。

最后，最复杂流畅的未来设计形式是“即兴蓝图”。这些设计可以根据使用条件进行自身修改，就像一个雄辩家即兴在讲台上回应群众的情绪和问题。即兴计算机蓝图软件是动态的。

后者是大自然的杰作。植物的DNA不直接决定植物的最终形状，它只是设定了一套规则用于环境出现特殊情况时控制植物生长。

3D打印机问世之前，任何有关形状的复杂构想都只是幻想、理论数学和计算机图形学的素材。只有大自然才有能力把生成的蓝图变成复杂形状。随着3D打印技术的发展，这些新的设计概念将最终走出虚拟世界进入现实世界。

食谱式设计

用食谱表达未来设计软件的工作原理可能最恰当。蛋糕的食谱不会详细描述蛋糕的最终形状和成分，相反，食谱描述的是做蛋糕的一系列步骤，本质上是一个程序。

一个简单的食谱也可以做成一个外形精美的蛋糕。将苹果片和葡萄干洒在千层饼上卷起来烘烤就可以做出苹果馅卷饼。食谱中的步骤顺序比口头描述苹果卷饼的形状、外观和材料成分要简单得多。然而，用食谱做出食物比食谱简单的建议要复杂很多。换句话说，整体要大于部分之和。

苹果卷饼食谱相当于设计软件的“几何编程”或“功能表示”。几何编程需要新颖的思维方式、丰富的想象力和个性的设计师，生成的对象也比用传统设计工具设计出的对象复杂得多。

几何编程软件可以很容易地描绘有些许差别的重复结构和半对称结构，但大部分雷同，也可以描绘由小的子结构组成的分层结构。

鉴于此原因，在设计复杂的和由许多小部件组成的模型时，几何编程软件可以大大提高设计者的工作效率。例如，设计一套需要用手指点击上百万次才能完成的由极细网格组成的锁子甲，如果用传统的计算机辅助设计软件做，将是一项极其痛苦、耗费时间的工作。

然而，如果你使用几何编程软件，这项任务将变得非常轻松。你只需要简单地写一个“食谱”：创建一个直径3毫米、厚度0.5毫米的环，然后水平交错复制1 000次，再垂直复制1 000次就可以生成一块布。按“回车”键，你的计算机辅助设计程序会按照“食谱”生产面料。

如果布料的重量和密度需要逐渐变小，你可以简单地调整“食谱”。你可以告诉计算机，当复制每一行时，下一行的网格要比上一行小1%。在复制2 000行后，你还可以让每一个小网格连接处的尺寸慢慢增加0.5%。如果你愿意的话，你甚至可以改变塑料的混合程度。

生长式设计

生长式设计进一步利用了食谱的概念。不采用集中的脚本，生长式设计采用了一个种子形状和一套规则，这套规则决定形状应该如何随着

时间的推移发展、变化。例如，要“长成”一棵复杂的像树一样的形状，首先你应当使用简单的“种子”：平底上的一个圆柱。其次要设立一个规则：在每个圆柱的未固定端按照字母“Y”的形状附着两个缩小10%的圆柱。使用这个规则，种子圆柱最后会长成树形。



图13–4　生长式设计可以用于设计更具有机外表和感觉的物品
图片来源：Nervous System, Inc.

生长式设计系统现在刚刚开始商业化，其中定制项目的大部分工作都由熟练的设计师完成。有时生长式设计程序被称为“形状语法”，打印时可以生成复杂的三维图案。

生长式设计系统适用于不同的设计规则、基本操作、基本形状和语法等。一些人试验过使用固定的规则，另一些人使用依赖于当前形状状态的条件规则。例如，当圆柱的直径大于5毫米时，按规则要将圆柱分裂为更小的圆柱。以生物学家阿里斯蒂德·林登迈尔命名的一套规则非常出名，它能够生成植物形状和有机组织，电影和游戏中计算机合成的郁郁葱葱的自然场景都是用该规则生成的。（你不会真的认为每一棵树都是美术家画的吧？）

生长式设计软件可以处理半随机规则，这些半随机规则可能会导致偶然的形状变化，或者根据预先设定产生不同的结果。半随机规则将确保场景中的每棵树看起来都像一颗真正的树，同时每棵树之间也会有细

微差别。与生物学不同，生成现象可以不断反复，形状也会变得更加丰富和复杂。

生物学中的现象是可以生成的：我们的DNA不会对我们身体的每个细胞所处位置、作用以及如何与大脑中的神经元相连进行编码。DNA也不是一旦执行就会产生一个人体的脚本。相反，DNA编码了一组规则，迭代使用于第一个生殖细胞直至形成完整的人体。

反应蓝图：复杂形状的自动化生产

用于形状描述的最复杂的语言形式就是动态的有反应的语言，我们将这种设计过程称为“反应蓝图”。这种反应蓝图使我们的设计人员能够实现复杂形状的自动化生产，这些形状会根据环境实时调整，而设计师们都不知道这些具体环境情况。

反应蓝图不做小物体。例如，你不能使用反应蓝图3D打印家里的洗衣机旋钮。反应蓝图可用于在未知甚至变化的环境中设计项目。

反应蓝图可以指引大型的水泥打印机打印出适应未知地形的房子、适应风力条件的桥梁以及适应特殊环境照明条件的灯罩。反应蓝图还将是外科手术的理想选择。也许有一天，3D打印机可以就地制造出适应每个人不同情况的生物组织。

设计软件执行反应蓝图时，首先需要扫描目标环境，并且能够非常准确地模拟目标环境，以便知道有哪些规则及它们何时起作用。利用这一信息，3D打印机才能生成适合特殊环境的形状，然后就可以用3D打印机打印了。



图13–5　反应蓝图将针对环境设计出最理想的家的形状

图片来源：Project “DIGITAL VERNACULAR” by Shankara S. Kothapuram, Mei-ling Lin, Ling Han, Jiawei Song, part of design studio: “Machinic Control” led by Marta Malé-Alemany and taught with Jeroen van Ameijde at the Architectural Association School of Architecture,

当设计师准备用3D打印机打印反应蓝图时，他是不可能提前准确，知道最终设计是如何产生的，也不知道最后是什么样子。每一步的反馈都是不同的，最终设计的具体细节也在不断变化。例如，自然界中植物往往向朝光的方向生长，但是一段时间后，由于自身重量增加引起的内部压力使得它在一定高度停止生长。如果你有能力设计植物的生长，你可以设计一套规则，使植物在接触外部光线的情况下继续增长。你可以用基于压力传感器的规则调节植物的增长、控制植物的高度，这样植物就不会因为长得太高而产生内部负担。

如果内部和外部两套规则同时作用于不同条件下的植物，那么植物的高度和形状很可能不同。即使两个植物同时应用同一套规则，一个放在暗光灯下，另一个放在明亮的阳光下，由于它们传感器发出的反馈不同以及规则引起的反馈产生了不同反应，它们最终的外表也不一样。

一种设计生产多种定制产品

未来的设计者如何将反应系统应用于产品设计过程呢？设想一下一个灯罩蓝图是动态的。从简单的初始形状到形成最终的灯罩设计会应用一系列规则，灯罩的形状不断被细化。在计算机中，灯罩被放在一个虚拟房间的角落中，挨着一个虚拟的窗口，软件将根据虚拟窗口附近的光线水平计算并设计一个特定的形状。

如果你将灯罩放置在另一个不同的虚拟房间，位置接近另一个照明设备，灯罩的设计将演变成一个新的形状。通过将计算机模拟的环境暗示运用到设计过程中，反应蓝图就可以根据响应数据而非根据形状描述形成产品了。

一个灯罩设计可能会引发许多其他自定义的设计，每项设计适用于特定的用途，尽管如此，每个灯罩仍像森林中的每棵树一样互不相同。如果你有这种灯罩的反应蓝图，只要在设计软件中准确地模拟每个房间的光线条件，就可以给每个房间生成不同的灯罩设计。

会思考的打印机

动态蓝图进一步发展，设计反馈将直接从现实而非计算机模拟中输入打印机。想象一下，一台3D打印机会知道它需要打印什么，并将根据打印条件进行调整。对于大部分3D打印机来说，它们是“盲目的”，因为它们只知道执行指令而不知道指令能生产什么物体，这种系统被称为“开环控制”。

康奈尔大学的丹尼尔·科恩探索了这一想法，即3D打印机能够实时监控自己所打印的产品。丹尼尔创造了一个闭环打印机，该打印机能够“观察”打印结果并根据不同情况进行动态调整。用一些渗出材料进行

打印，可能无法很好地保持形状，例如在炎热的时候用蜡进行打印，用蜡打印时，一些地方可能会因融化而与预期有所不同。这种情况下，开环控制打印机会继续工作，打印出一个畸形的物体。

为了纠正这样的问题，丹尼尔将光学扫描仪添加到3D打印机的顶端。本质上，光学扫描仪可以观察3D打印机是如何打印的。丹尼尔闭环控制打印机，因为有了扫描仪，所以可以检测出问题，比如蜡质产品融化变形。

但是，这种监测只是第一步。通过创建能够从光扫描仪读取输出结果的软件，3D打印机能够根据环境的变化做出调整。通过跟踪打印输出结果，修改设计以更正它们，并实时调整其打印过程，你可以说，这台特殊的3D打印机正在“学习”。

闭环打印的贡献不仅仅是监控打印品的形状。如果程序正确并给予适当的硬件传达环境反馈，闭环的3D打印机就可以监控它正在打印的材料的强度，并根据需要添加材料。智能的闭环3D打印机可以在打印材料时监测材料的导电性或弹性。事实上，使用适宜的闭环3D打印机并遵从动态的设计蓝图发出的指令，任何材料或结构属性都可以被实时测量和修改，进而制造出来。

改变设计工具的形状

首先我们塑造工具，然后工具打造我们。3D打印的设计反映了多年来物理约束的影响，类似于录制音乐打包出售。你还记得黑胶唱片专辑吗？一张唱片包含许多歌曲，每首歌曲三四分钟。因为一张唱片专辑只能容纳这么多内容，所以每张唱片大约有10首歌曲。

其实唱片并不神秘。没有深奥的审美理论规定艺术家必须定期推出一批大多是同等长度的歌曲，并把它们全部保存到一个已命名并用艺术封面装饰的物理存储器内。莫扎特当然不遵守这个标准。然而我们现在录制音乐的观念仍然受到已经过时了几十年的黑胶光盘的影响。

年龄偏大的音乐爱好者都钟爱唱片。设计师考虑的是曾经有限的计算能力和生产机器的物理限制所带来的制约。

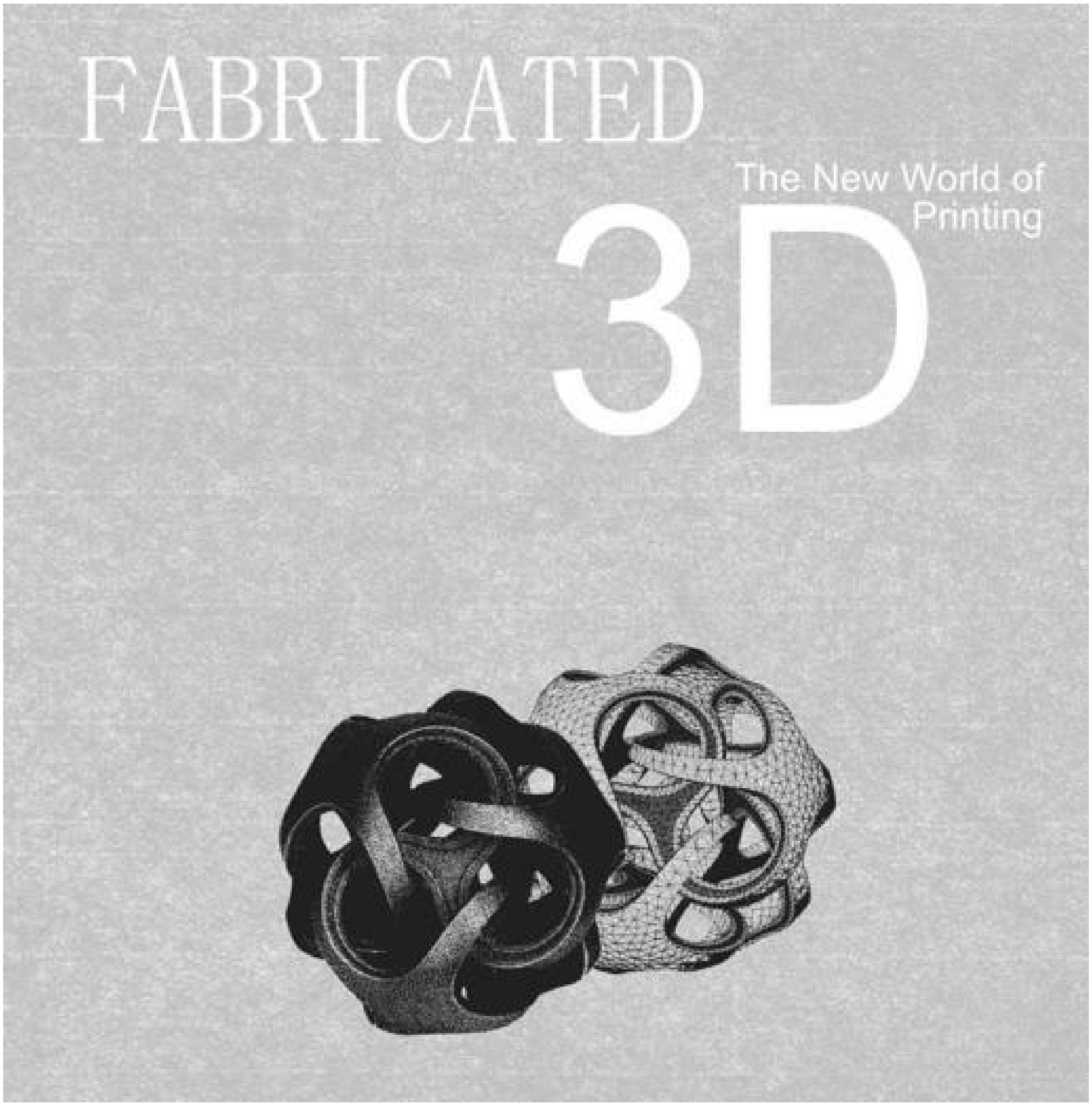
我们的想象能力和3D打印实物的能力将与设计软件设计形状的能力共同发展。未来的设计工具将很直观，一些设计工具将可以对触摸、运动和环境条件做出反应。计算机将会更熟练地描述形状并有足够的智能解决我们不能解决的设计问题。

人类将通过输入数据或者去除不想要的设计解决方案，并提出更多令人满意的方案引导计算机的设计策略。就像斯瓦木·克里什在他的博客《生成式设计》上写的那样：“答案不在于消除人类设计师，而是在

于帮助设计师管理贯穿整个设计过程的约束条件和需求。”

例如，在生物打印领域，血管系统还没有相应的设计软件。总有一天，医生会用生长式设计软件解决这个问题。医生不是通过直接描述一个肾脏错综复杂的分支形状设计一个复杂的血管系统，而是指定一些基本规则，然后“设计”出肾脏的血管网络，并启动生长式设计软件“生长出”一个精细的静脉网络。大自然为植物和动物创造了一系列惊人的复杂的排列“设计”，甚至包括非生命物体，如水晶和沙子的模式。我们已经可以利用3D打印机制造复杂的结构，但这些设计仍然遥不可及。

第14章　3D打印的下一篇章



人类之所以有别于其祖先，就是因为会制造工具。增材制造技术可能会成为永久改变人类文明的最终工具。伴随着不可预测和无法抗拒的海啸般的冲击，每一次设计和生产工具的改进都会掀起社会变革的新浪潮。对于崭露头角的实物打印世界而言，这本书只能触及其冰山一角。

当我还是马萨诸塞州波士顿市布兰迪斯大学的一名博士后时，我的导师乔丹·波拉克和我打印了一个完整的工作机器人。这是一个简单的机器人，但是其整个身体都是自动设计和打印出来的。1999年年底，第一个机器人打印完成，而后历经10个月，直到2000年8月下旬的某日，这个消息才登上了《纽约时报》的头版。

那是个喜忧参半的时刻。首先，报纸的编辑明确告诉我们，这则消息之所以能够上头版，是因为编辑们急需新闻。那一天—2000年一个闷热的夏日，是有史以来报纸出版最慢的一天。没有（绝对是没有）什么其他消息可以刊登在头版，所以才有了《机器人制造机器人》。

但是一种更挥之不去的感受与这则爆炸性的消息无关，而是不满意，不满意这个机器人不完全是3D打印出来的。机器人的身体和关节是打印出来的，这是令人兴奋的进步，但是它的其他大部分，使之成为机器人的零部件（电线、电池、传感器、驱动器和“大脑”），则是人工组装的。要想真正打印出一个完整的机器人，包括电池等零部件完全组装的机器人，仍然任重道远；要想打印出一个完全活动的、不需要组装的系统也需要一段时间。

作为新一代产品的领航者，3D打印机的首次亮相可能并不能像正在发酵的政治丑闻那样吸引眼球，但却暗示着新一轮更大变革海啸即将来袭。

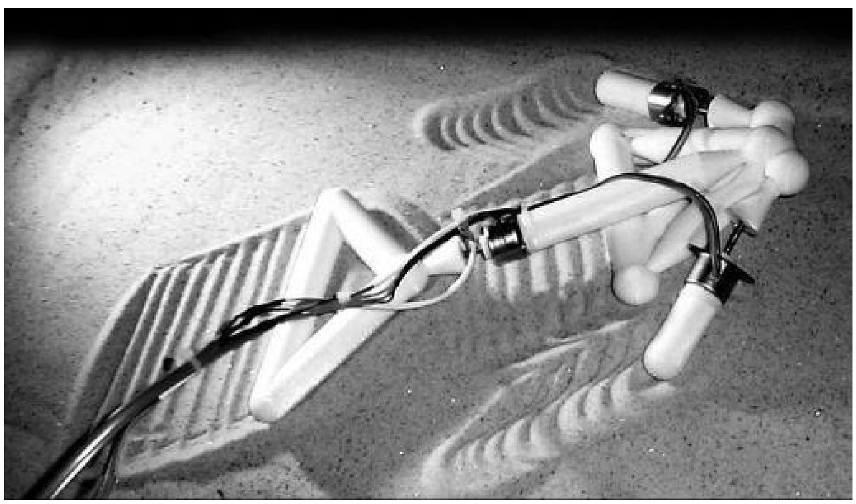


图14–1　GOLEM项目打印出来的进化机器人（2000年）

注：白色的机身通过进化模拟设计并用3D打印机制作，电线和电机由手工完成。

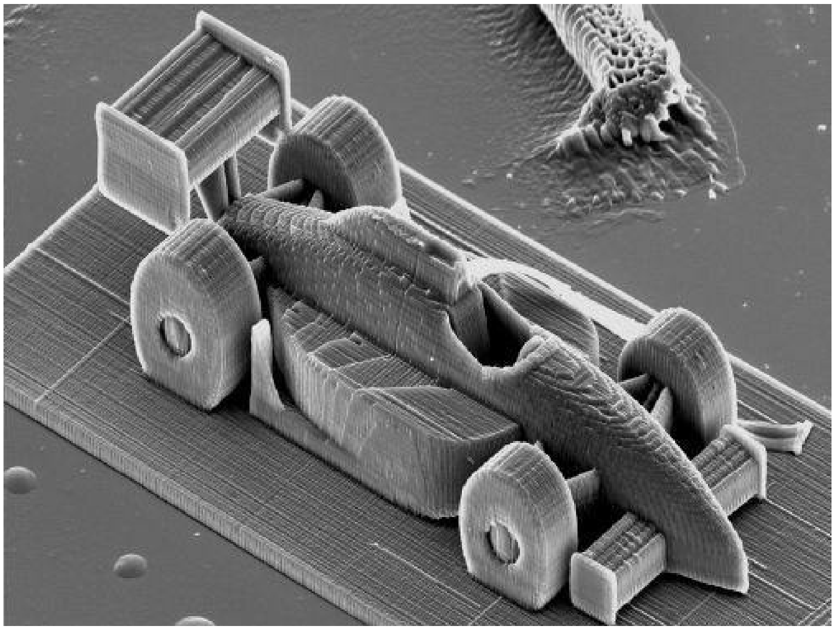


图14–2　285微米赛车：在微尺度上使用立体光刻工艺进行的3D打印

图片来源：Jürgen Stampfl,Vienna University of Techology

科幻作家科利·多克托罗说："我认为科幻小说家不擅长预测未来。我们大多是在未来的外衣下描绘现在。"那么3D打印和设计技术的未来外衣是怎样的呢？不久的将来，我们将很快拥有更多可供选择的材料、更高的打印分辨率、更快的加工速度和更低的机器成本。新的应用和意想不到的新事物将会源源不断地涌现。那之后呢？

3D打印的三个篇章

本书首先回顾了增材制造技术的演变，作为人类进步的一大里程碑，它标志着人类在控制有形物质方面所取得的进步。旅程的第一篇章回顾了人类史无前例地实现了对物体形状的掌握。今天的3D打印机几乎可以打印任何材料：从尼龙到玻璃，从巧克力到钛，从水泥到活细胞。

创造任意形状的能力已经产生了深远的影响，超过了工程设计。大规模生产正在成为大规模定制。未来，随着3D打印技术的改进，每个人都会设计和制造复杂产品。与传统制造业并存的资源和技能障碍将得以缓解，使创新大众化，持续释放人类创造力。

旅程的第二篇章刚刚启幕—控制物质的构成，不仅仅是塑造外部几何形状，而是以前所未有的逼真度塑造出新的超材料的内部结构。

有一天，我们将能够用不同的材料制作材料。当3D打印机可以通过新的方式将原材料加以混合，新型材料就会出现。材料制造过程将会摆脱传统的先制造单个零部件后组装的弊端。有了混合材料打印，多元结

构的部件将会被同时制造、同时组装出来。在一个较小的范围内，我们将会以纳米级的精度将多种材料嵌入和编排到复杂的微观结构中。

基于该种可能，你可以打印定制的网球拍以巧妙地放大你独特的反手能力，或者为缓解你的背痛植入定制的椎间盘（但这两项在职业运动中可能不被允许）。尽管这种可能性非常大，但很少有材料科学家能够预测这些新材料的性能，也很少有设计者能够开辟出全新的设计空间。为了增强人类的创造力，新的设计工具亟待出现。

旅程的第三篇章正如我们已经观察到的早期迹象，就是控制行为。在这一篇章中，我们超越第一篇章中对物质形状的控制，也超越第二篇章中对结构的控制。在第三篇章中，我们将程序编写进材料，使其具备我们所需要的功能。我们不再打印被动的零部件和材料，而是打印能够感知、反应、计算和行动的综合的主动系统。我们不仅要控制物体的机械功能，更要控制信息和能源的处理过程。

当这一天来临时，我们将能够打印几乎任何东西—比如手机或者从3D打印机里溜达出来的机器人。但是，如同任何科幻小说一样，这里也存在一个隐情。这种机器人看起来不会完全像今天的机器人，因为它不会受限于传统制造业的约束条件，也不会直接由人类设计，因为新的设计空间太大，让人难以捉摸。如果人类能够制造出由被动和自由积极的两种子结构组成的灵活系统，那么通往新的设计空间和新的工程范式的大门将被开启，其所产生的强大力量不亚于生物学。

多元材料的混合制造

从更长远的角度看，3D打印技术的核心是具备多元材料同时打印的能力。在前面的章节中，我们提到过3D打印机可以打印不同材料制造的部件。例如，一个塑料的挤压机可以这一次用红色塑料打印，下一次用白色塑料；一个金属打印机可以打印夹杂着不锈钢的钛金属。事实上，不同材料组件的联合制造能力可以消除传统组装的挑战和局限，使我们能够制造日趋复杂的物体。但是最令我们对多元材料打印感到兴奋的是，多元材料联合打印不仅能够同时打印多种材料，还能使这些材料模式化为复杂的新的超材料。

在纸张打印机出现的早期，有些点阵式打印机配有四色色带，可以打印红色、绿色、蓝色和黑色，但是每次只能使用一种颜色。历史上甚至还出现过配有8种颜色、8支钢笔的笔式绘图仪，但需要提前加载绘图仪上你想用的颜色，并且一行只能使用一支笔。

当打印机在精确率和分辨率不断提高的基础上实现即时混合基色时，打印技术取得了突破。如同从单色打印机过渡到彩色打印机，或从

黑白电视过渡到彩色电视一样，只添加三种基色就可以产生数以百万计的深浅色调。随着同时混合打印的基础材料的增加，3D打印机所具备的功能会成倍增长。因为你不仅可以打印这些基础材料，还可以通过基础材料的排列组合打印出基础材料的组合体。

探索多材料打印的先驱公司之一是Objet公司—位于特拉维夫附近的一家以色列公司，最近并入了Stratasys 公司。我参观了Objet 公司总部，探访其正在进行的研究。位于橘树林旁一个繁华的科技园里，Objet公司正在改变人们对材料的看法。Objet公司的首席技术官爱德华多·纳普达斯和首席材料科学家丹尼尔·季科夫斯基带我参观了接待大厅，那里到处都是多材料打印出来的解剖模型、工业原型和玩具。

丹尼尔和爱德华多解释说，多材料打印不仅要混合材料，而且要创造出全新类型的材料。

材料科学家沉迷于新材料，通常是对新材料的新性能和特征（如重量、强度和灵活性）感兴趣。工程师通常对拥有多种性能的组合体更感兴趣，例如同时兼具轻质和强性能的材料，或者同时具备灵活性和光学上的透明度的材料。一些材料的特性是直观的，如密度和灵活性，其他特性则不那么直观，如材料在断裂之前所能持续的拉伸周期，或者在其折断之前能延展的长度。例如，当工程师设计飞机机翼时，由于存在湍流，会对机翼结构施加影响的拉伸周期或者与增压和减压周期相关的机身压力重新核算，这一性能就是所谓的疲劳强度。

材料性能会复杂到难以理解和预期的程度，而“材料设计”仍然是材料科学的圣杯。3D打印可以在很大程度上增加材料的种类，但问题是我们不知道它的未来走向和未来预期。

在第一次打印多材料时，直观的感觉是混合材料的性能可能会介于基础材料和主要材料之间。如果将相等的硬质材料和软质材料混合在一起，你将会得到一个半硬半软的材料。但事实证明并不完全如此，最终成型的材料属性取决于你混合材料的方式。

例如，如果按照棋盘式的图案打印软硬材料，新产生的材料可能会具有一定的硬度。但如果你按照随机样式打印同样两种类型、同样数量的材料，你就会得到硬度更强的新材料。打印模式、不同的材料由打印机依需求混合。

如果你眯着眼睛低头看棋盘图案，例如棋盘式的地砖，你可以看到黑白交替的对角线。同样，当两种材料以棋盘图案进行打印时，软质材料的长对角线链就会变成“薄弱环节”，使复合材料更软。但如果你按照随机样式将两种材料混合打印，就不存在鲜明的“薄弱环节”，所以整个材料就会变得更硬。

科学家们很早就知道材料中原子的纳米排列决定了其总体性能。从业者在几个世纪前就指出，随机模式比规律模式更坚硬。铁匠将热金属剑在冷水中进行淬火以使金属能够快速冷却，然后形成任意形状的小晶体，而不是使之慢慢冷却成为柔软、光滑、可锻造的铸铁。但是这是我们第一次能够直接地、明确地控制这些模式。然而目前我们不可能在原子纳米级水平上直接控制，而是在微尺寸的基础上逐渐摸索下去。

材料的性能可能会变得更奇怪。如果你按照某一模式打印多元材料，其材料特性可能超出基础材料的性能范围。按照某一模式混合软硬材料，你可能得到比其中任一种原始材料更硬的全新的合成材料。如同你把比钢软得多的木头和塑料混合，可能会得到类似钢的材料。

材料变脆弱的一个原因是，一些小的缺陷会变成微小的裂缝，在材料断裂之前会在结构中加剧。如果我们能够策略性地将软质材料嵌入这些脆弱材料中，这些软质材料的补丁会缓冲这些裂缝，使恶化得以停止，延缓对硬质材料灾难性的影响，使其变得更为坚硬。蚌壳就有类似有趣的性能，但是直到最近，制造这样的材料还仅仅局限在“大自然母亲”的范围。显然我们还不能像自然一样注塑材料。但是有了多材料打印，我们可以随意制造它们。

还有个例子，与材料的弹性和它们在压力下的弯曲和伸展有关。如果你曾经拉长过橡皮筋，你会注意到橡皮筋被拉得越长，它就变得越细。大多数材料都如此，这就是所谓的泊松效应，它是由首先系统阐述其特征的法国数学家和物理学家西莫恩·德尼·泊松命名的。然而，当你换一种模式将软硬材料进行混合打印，使得材料纵向拉长时，横向也会变宽，这也不是没有可能。具备这种奇异的、反自然材料属性的是一种负泊松比的材料，被称为拉胀材料（Auxetic Material）。

拉胀材料还没有在自然界发现过，传统的制造技术很难将其生产出来。但如果拥有一台高分辨率的多材料3D打印机，你就可以根据需要制造出拉胀材料并把它们嵌入其他结构中，制造出奇异的机器。例如，利用拉胀材料设计制造出来的汽车可以吸收撞击产生的能量以确保乘客的安全。用拉胀材料和常规材料混合制造的前保险杠能够吸收撞击产生的能量，将其传输分散到不同的方向。

还有更为不寻常和有用的模式。我们可以通过层压模式打印硬质和软质材料，使混合材料能够在一个方向上灵活、在另一个方向上僵硬。这个属性本身看起来并不吸引人，直到你意识到你可以用定制的弹性性能打印物体。例如，一个定制的支架或植入物可以帮助病人在膝盖受伤后，在一个方向自由弯曲他们的膝盖，而在另一个方向支撑起他们的膝盖；一双定制的手套可以提升攀岩者紧紧抓住突出物的能力。

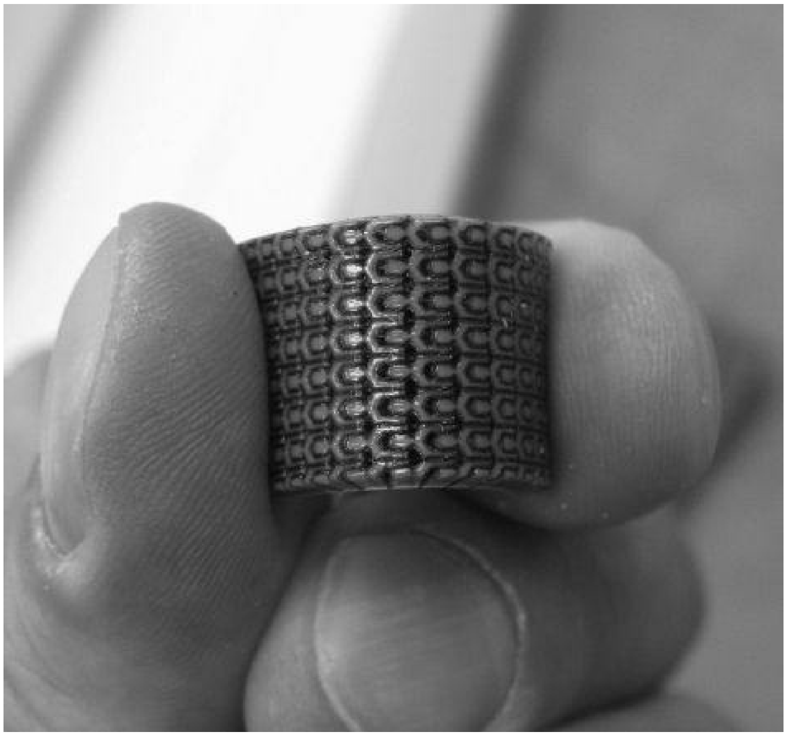


图14–3　具有自修复微结构的多材料。球窝在临界压力下释放，但可以重新聚合并恢复到原来的模式

图片来源：Daniel Dikovsky, Objet Inc.

在我参观Objet公司期间，爱德华多和丹尼尔将手伸进抽屉，掏出了几件奇怪的新材料。他们向我展示了一件他们打印出来的自修复材料。他们解释说，这个材料能够承受极端的压力，如果压力超过极限，材料就会屈服，但在压力消除后，它会完全地“愈合”。

这种材料通过把原材料存放到微小而相连的“球窝”构成。这种由环环相扣的百万计的组件构成的材料会持续保持弹性直到球从窝内蹦出。如果压力消除，球就会弹回原位，材料恢复为原来的形状。

我仔细观察Objet公司的新型材料，它看起来就像个普通的灰色塑料，我想象这个普通却非凡的打印材料用途到底有多大。假如你的汽车保险杠因车辆事故折断（从经验上讲），试想如果你将断裂的保险杠推回原位，它就能够自动地恢复原状，那该多好啊。

动态的材料可以依据承受压力的大小由硬变软，就像研磨的咖啡在真空包装后硬得像砖头，但在打开真空包装后却能够像液体一样流出。所谓的干扰材料即能够依据环境而改变硬度。

构建材料性能的效果并不是凭直觉就能获取的，即使是像碳纤维层压板这样相对简单的复合材料，也需要材料学家和工程师倾其毕生精力来研究。高分辨率多材料打印机的问世开辟的崭新设计空间太大了，以

至于预测材料的特性变得非常困难，更不用说探索材料的设计了。随着3D打印机储存多材料范围的扩大，新的材料有时会被偶然发现，有时则需要深入探索。与设计师需要通过新的计算机辅助设计工具、应用新的语言和设计理念设计出新的图形一样，探索全新的材料领域也需要新的设计工具。

活性系统打印：打印完整的机器人

到目前为止，不论材料是硬或软，是弹性或坚硬，本章所讨论的都是被动材料打印。被动材料以一种可以预知的机械方式对所处的环境做出反应。未来，我们将打印能够行动、反应、感知、运算和回应周边环境的活性材料。对打印活性材料的探索时断时续，所以目前大部分杰出的3D打印作品不论大小、复杂程度，仍属于被动打印的范畴。

目前活性材料打印取得的初步成果是打印导电材料。我们已经知道如何打印金属，而金属是很好的导体，那还存在什么问题呢？目前的挑战是如何在非导电材料中嵌入导电材料，比如塑料绝缘体包裹的铜线。如果能够在非导电体中打印导体，那么你就可以用预装配的线束打印机器人、用复杂的定制的天线打印手机、用内置传感器打印假肢以及新型消费电子设备。

打印导线面临着双重挑战—超出了多材料打印的能力。这个挑战是要确保两种材料可以相互兼容。如果你尝试同时打印金属和塑料，金属熔化的温度就会烧掉塑料，导致两种材料无法相容。

找到熔融温度较低、与塑料相容的特殊导电金属的可能性也是存在的，但是这些材料很少，也很难被利用。另外，也可能会找到非金属导体，例如导电塑料，但是并不会像金属那样实现完全导电，所以探索仍在继续。

在Objet公司，对于打印在非导电结构材料内嵌入的导电材料，爱德华多和丹尼尔信心满满。他们坚持认为问题不在于技术，而是商业优先权的问题。工业领域渴求更强大、更耐用的3D打印材料。导电材料在短期内难以进入商业视野，它们还不属于优先考虑的事。

这就形成了一个恶性循环：工业需要更强大的材料，以期超越已有材料和传统制造技术的能力。任何形式的传统制造都不可能达到制造嵌入式3D导线的能力。除了少数前卫的机器人设计师，3D打印线路还没有市场需求。

然而，学术界的任务是要超越短期视野并看得更远。展望长远的未来，导电材料将只是活性材料的冰山一角。目前，很少有研究人员在研究电池、电机和驱动器、晶体管和传感器的打印。

虽然我们看到的是活性材料，但实际上我们讨论的却是活性系统。就自身而言，活性材料几乎毫无用处，通常是将多种积极材料混合才会有所应用。如何从打印被动的单一材料零部件过渡到打印活性的、多材料集成系统是当前面临的挑战。

集成系统的一个很好的案例就是3D打印电池。如果你翻开一本电池化学课本，你会发现很多制造电池的方法：标准碱性电池、可充电锂离子电池、锌空气电池等。所有电池都具备相同的基本结构：正极材料和负极材料，中间有“分离层”，像个奶酪三明治，上面是白面包，下面是全麦面包。这个大而薄的“三明治”被卷起并装进筒内，与两根电线相连：一个连接正极，一个连接负极。

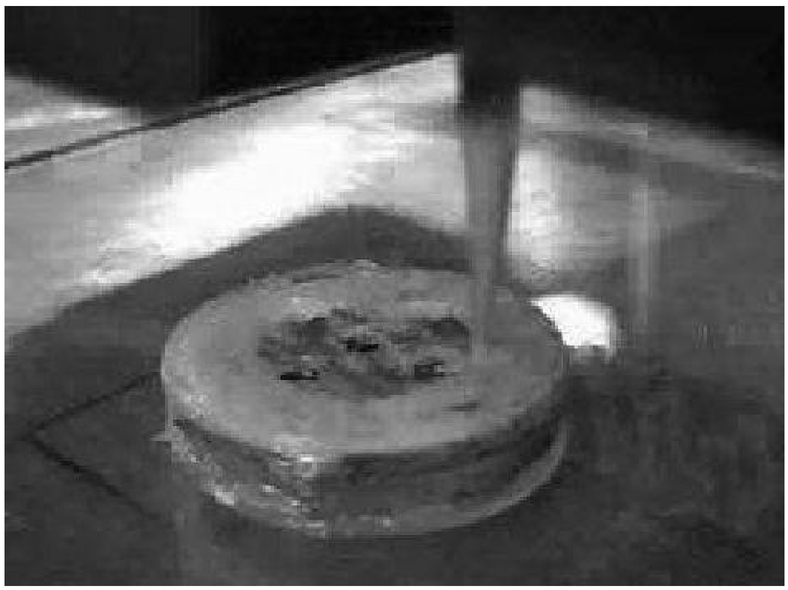


图14–4　打印出来的电池

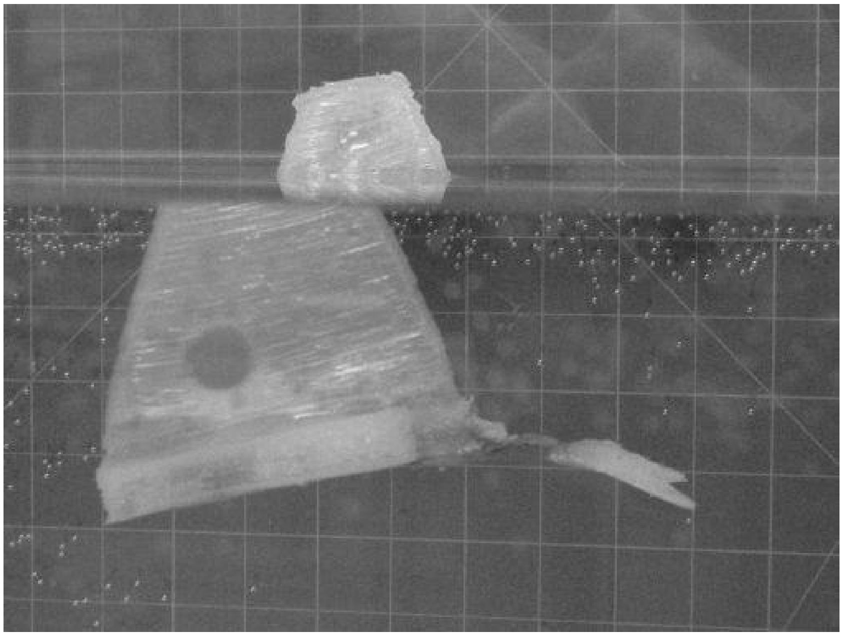


图14–5　埃文·马龙的3D打印机器鱼、电池和驱动器（2010年）。还没有完全打印出来

电池工作的原理是：正极中的离子（带电原子）会移动到负极。它们在移动过程中产生电流。正极材料和负极材料（面包）、分离层（奶酪）和电池类型的不同组合，会形成不同的电池种类和性能特征。

首个机器人出现在《时代周刊》之后不久，埃文·马龙加入了我们在康奈尔大学的实验室。埃文当时的目标就是要打印一个能走出打印机的机器人。在面临其他技术挑战之前，他首先必须面对一个更具挑战性的问题，即当时的商用打印机制造商只允许本公司员工开拓新材料的打印机。3D打印机制造商会竭尽全力地保护自己的专利材料，使用任何未授权的材料将不再保修。而且，任何一个理性的研究者都不会只为了看打印机堵塞和停止工作而将活性材料塞进价值10万美元的机器里。

探索不受现有商用打印机限制（技术壁垒和合同限制）的新材料激发了Fab@　　Home项目组（某种意义上讲也叫RepRap项目）的研究热情，也带动了后续一系列开源3D打印平台的开发。简而言之，低成本的DIY打印机更具创新性，而且如果停止工作，使用者承担的风险更低。

埃文使用相关材料加载了3D打印机，马上遇到了第一个障碍：正极材料和锌粉变成了糊状物，不能通过喷针流动。他越用力越流不动。

当埃文用各种肥皂和胶水克服了糊状物的问题后，他又遇到了新的挑战。多数电池中都有纸质分离隔层，甚至我们家中使用的电池也有纸质隔层，分隔正负极材料（就像是两片面包之间的芝士一样）。而分离

隔层不能是任意材料，必须具有半渗透性，只能让离子穿透，不能让电子穿透。纸质材料就具有这些特性，但有讽刺意味的是，我们能打印几乎所有东西，就是不能打印纸。经过数月实验之后，埃文发现了一种由某种胶质制成可打印的分离隔层的方法。

有了这个新方法，埃文用5种材料打印出了不同型号的电池。虽然这些电池的电容量只有相同体积工业电池的一半左右，但它们的形状完全可以定制。他可以打印出各种形状的电池，如做成腿的形状，以作为机器人的一部分。

打印驱动器，即可移动的活性材料系统，是一个更难解决的问题。现在我们虽然可以打印出电动高分子驱动器、蜡质驱动器甚至是电磁驱动器，但是要把这些性能综合到一起就没那么简单了。单一的驱动器并不能满足我们的要求，而一块单独的电池也是不够的。活性多材料打印的最终意义在于能够创造出从打印机里走出来的完整的机器人，包括电池。

最后的篇章：从模拟到数字

在最后一章里，我们看到崭新的成果，即最大胆、最雄心勃勃地设想从模拟打印到数字打印的转换。在进一步探讨之前，我们必须澄清几个概念，因为“数字”这个词内涵太多，在不同的语境中有不同的含义：

1. 指的是纯粹虚拟的、没有实际载体的信息，就像“物理型VS数字型”一样，例如数字报纸。

2. 指的是电子的、可编辑的信息，就像“机械型VS数字型”一样，如数字恒温器。

3. 指由分散的、不连续的单元构成，就像“模拟型VS数字型”一样，如数字钟。

虽然数字计算机能以虚拟化的、电子的、多个“0”和“1”离散点的方式快速呈现信息，问题也随之而来。但物质形态中也有“数字”的物体，在另外两种意义上保存其特征，即可程序化编辑且由众多微小的离散点组成。

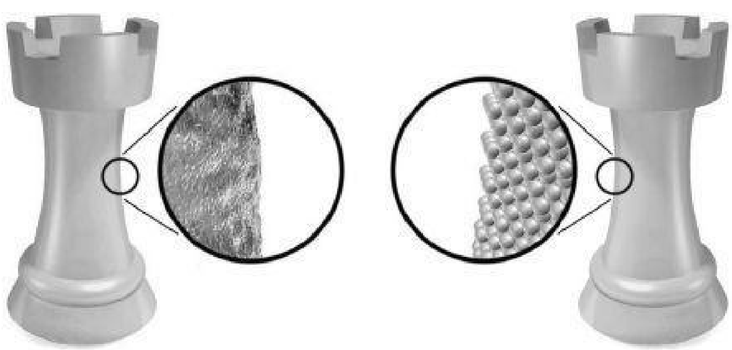


图14–6　模拟材料与数字材料对比

注：数字材料是由多个具有物理特性的立体像素离散点组成。

图片来源：Jonathan Hiller

大多数物理目标体都具有模拟特性。模拟信息系统是连续的，意味着模拟信息系统下的信息传递是流畅的。如钟的分针是绕着时钟连续运转，而数字钟不是连续运转的，数字钟中间有60个非常明确的中间状态，它停留在一种状态，然后瞬间切换到另一种状态。我们常用的计算机文档就是数字型的，因为它们是由“0”和“1”字节组成，中间没有任何间隔。

相反，大多数当前的制造技术都是模拟型的，因为所生产的材料实际上都具备连续性。不过事实并非如此。

我第一次见到尼尔·格申费尔德是在麻省理工学院的比特和原子研究中心。坦率地讲，我很钦佩他能为自己的研究中心取了一个这么确切的名字，而我始终都不能为我自己的研究工作精髓想一个比较恰当的名字。2005年夏天，我和他刚完成第一轮电池打印测试，测试结果是电池仅仅从电子性能上来说具有“数字性”，从其他方面来说，它具有物理性能和模拟性：电池是由连续的原材料流组成的。

我试图详尽地解释整个电路打印过程，但尼尔显得有点儿着急。“为何不在里面放置一个带有整个预置电路的芯片呢？”他边问边打开一个抽屉，拿出一个比米粒大不了多少的微型晶体管芯片，如果放入一点儿电路，而不是一点儿墨水，会是怎样的效果？

起初，我认为格申费尔德的理解出现偏差。放置一个预置电路板简直就是耍小聪明，因为它使得印刷电路在一开始就不能正常运转。然而，随着我思考的深入，我发现这个“小聪明”似乎能行。一个生物体是由22组模块组成（22组氨基酸），这22组氨基酸能够通过自身不同的排列组合产生无数蛋白质，最终形成生命形态。

生物学家能够快速地指出对生命来说氨基酸并非全部。当然，生命体需要能够组合和分离氨基酸的能量。但从某种意义上讲，生命结构是由氨基酸模块组成的。这种组合使得生物意义上的生命形态具有自我修复的功能。动物和植物之所以能够互相消化共存，又可以重复转化为各自生命质体，是因为我们所有的生命体都是由这小小的22组相同的模块组成。

同理，像素就是一个图像中的一组模块，字节就是一组信息的一个单元，氨基酸就是一个生物物质的一组模块，立体像素就是一个体积像素（其名字由此而来）。物质的最小基本单位是原子，打印机的最小基本单位应该大一点儿，大概有几百微米，与一粒沙子一样大。

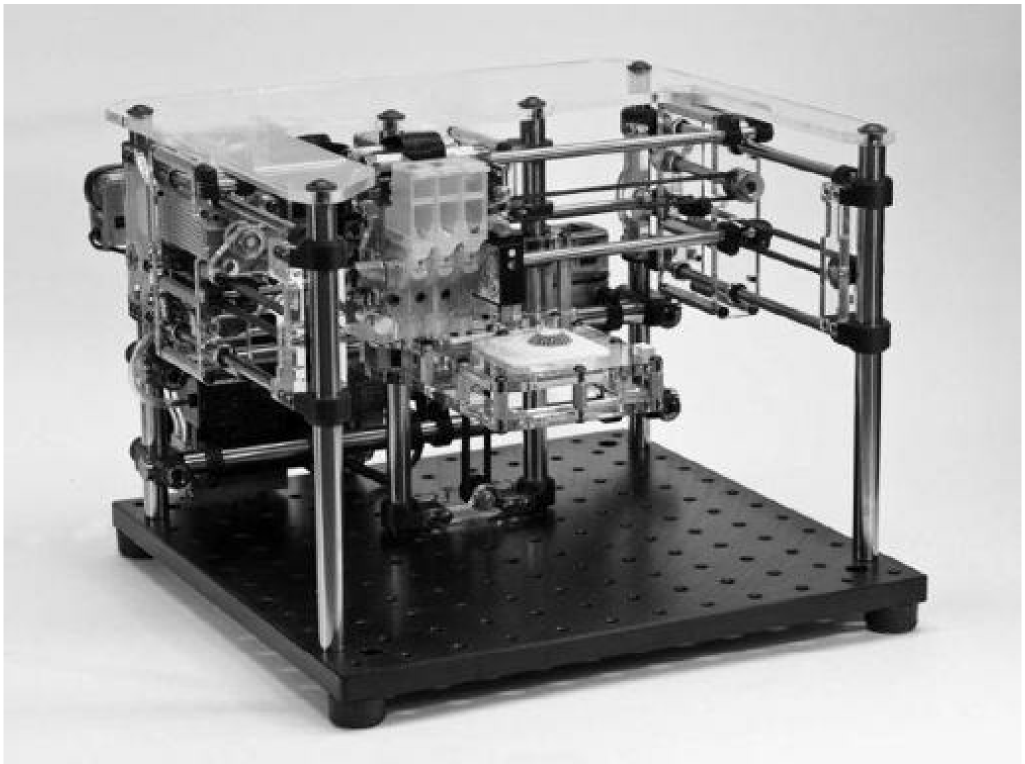


图14–7

注：一台快速装配机就像3D打印机，逐层构造物体。但是快速装配机是通过组装大量小模块逐层构造目标体。

图片来源：Jonathan Hiller

如同艺术家调色板里的颜料一样，一些不同类型立体像素就足以满足你的各种需求。如果说不足24种元素就能创造所有生命体的话，那么一组基本的立体像素就能打开广阔的想象空间。首先，我们中和硬性和软性立体像素，仅用这两种类型的立体像素，就可能制造硬性和软性的材料。如果加入导电的立体像素，就能制造配线；如果加入电阻器、电容器、感应器和晶体管性能的立体像素，就能制造电路；如果加入驱动器和传感器的立体像素，那么就可以做机器人了。

立体像素只能存在于实验室环境下，也就是说，能够处理立体像素的打印机还不能在实际情况下工作。但是认为日常物体将由数以亿计的指令形成的微小立体像素构成，这一想法令人震惊。正如氨基酸就是低等级的公分母，能够使大自然很好地循环各种物质，同样，如果所有产品都是由一些最基础的立体像素组成，那么产品也就是可打印的，也能被分解、重印成其他产品形态。

为了让3D打印成为可能，我们首先要制作微型立体像素，并找到一个能快速处理立体像素的途径。快速计算法要求的是，用沙粒大小的立体像素制作一个鞋盒大小的物体，就需要近10亿个立体像素来完成。而

处理这10亿个立体像素需要花很多时间，即使机器人能每秒成功装配一个立体像素，处理完也需要大约30年。解决办法就是平行排列立体像素，同时装配整个图层上的立体像素。

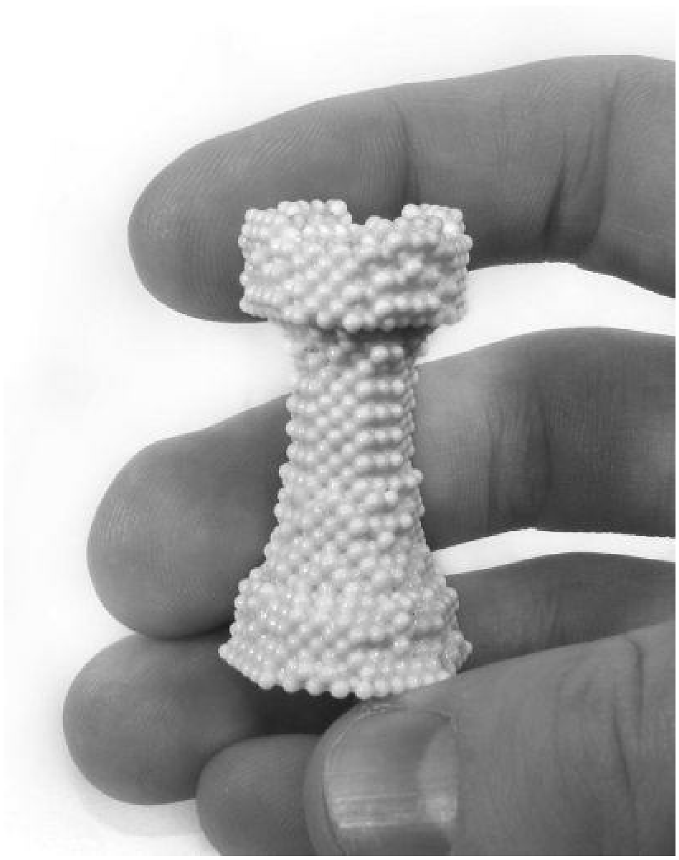


图14–8

注：由一台快速装配机组装的第一个由1万个立体像素构成的物体。它还是比较粗糙，就像早期的计算机制图一样。或许有一天我们将拥有一台千兆立体像素打印机。

图片来源：Jonathan Hiller

未来的装配机能够挑出大量平行排列的立体像素（就是同时将多立体像素并行处理），并同时将这些像素重新排列组合放回各个图层，这就意味着我们打开了通向“数字材料”的大门。为了区别原始的模拟打印机，我们称这些新一代的机器为“快速装配机”。3D打印机之后的下一次革新就是从模拟材料到数字材料的转换。

模拟–数字混合打印

试想一下，在一个由无数微型模块组成的人造世界里，每个模块的尺寸相同、形状相同，都具有电子和机械连接器。正如微型乐高方块一样，也就100微米大小，和屏幕上一个像素差不多大，这些模块相互咬合。24组模块中的每一个在体积上都是独立的，如同墨盒里的墨粉一样

被运向快速装配机。



图14–9　模拟–数字混合打印概念图

注：躯体是用透明的模拟介质打印的（表明光滑），里层是高仿立体像素组成的可视数字格状结构。

图片来源：Robert MacCurdy

完全由数字立体像素制造产品之路可能还很长，不过，我预想模拟和数字材料的组合体将会出现。混合3D打印技术将会综合模拟打印的连贯性能，可以制作一些被动材料，而数字立体像素打印技术可以制作那些难以制造的需要连贯处理的材料。

机器制造机器的时代

作家雷·库兹韦尔普及了技术奇点理论，这个概念假定这样一种未来：机器具备以幂次方的速度加快自我升级更新的能力。这个理念中受到广泛认同的就是“智能大爆炸时代”的理念，这个理念预示着，智能机器能够连续设计出更强大、更智能的下一代机器。

目前，由于现代机器生产本身变得越来越精细，越来越复杂，现代机器还不具备自我设计和自我生产的功能。现代制造机器不能根据所处的物理环境条件自我调整。而3D打印技术将通过填补奇点理论推断中的空白，挑战我们之前认为再自然、再正常不过的概念。

将来的某一天，3D打印机将制造出活性数字物体，其能够自我重新装配成智能机器，然后重新设计，制造出自身的改进版本。

机器制造机器的概念反复出现在科幻小说中，也经常在学术界作为严谨的课题来研究。大家都致力于此概念，可以说还有两个可能的原因。第一个原因在于实践的拓展性。创造一台能够创造更多机器的机器将会使技术的发展登峰造极：在整个生产过程中，没有人工参与，生产仅限于原材料、能量和时间。

第二个原因就是人类深藏于内心的精神需要，也可以叫作狂妄自大，但我们需要去创造。自然之所以能够区别于人造物，是因为自然生物能够创造更多的生物，而机器不能。核心就是自我生产是生物学的终极标志。如果你能制造一台能制造其他机器的机器，那么你就达到了创造的新水平。

在未来（或是在星际纪年的未来），机器可以制造机器。3D打印机就是第一波新一代智能机器，它们能设计、制造、修理、回收其他机器，甚至能够调整和改进其他机器，包括它们自己。

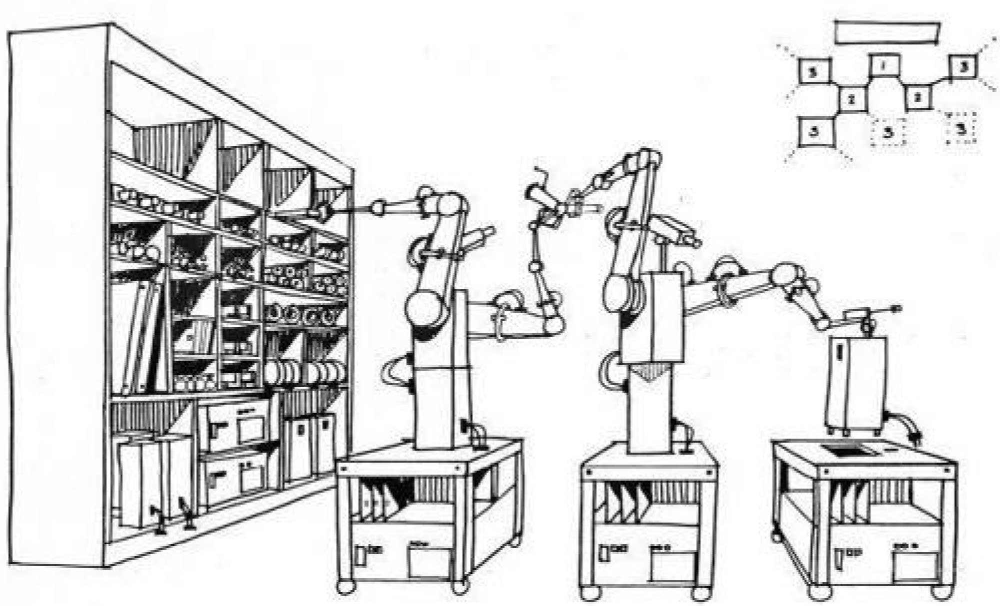


图14–10

注：图片由美国宇航局委托研究项目组提供。“一个自我复制、自我成长的月球工厂。”美国航空航天学会会员罗伯特·A·小弗雷塔斯和威廉·P·吉尔布雷思在1981年如是说。

图片来源：Robert A .Freitas Jr. (www.rfreitas.com)

我曾带我的儿子去看《星球大战》电影系列中的一集。在几个场景中，各式各样装有激光的宇宙飞船、机器人和其他破坏性工具正在炸毁大量财产，包括建筑物、汽车以及其他机器人。最后，眼看着毁灭在持续，我以大人的口吻大声耳语道：“真可惜！成千上万人的努力毁于一

旦。不花个几年时间，也要花上几个月的时间重建这一切了。”

我儿子没明白我在说什么。他回答：“这些东西不是人建成的，是机器人建的。”

FABRICATED The New World of 3D Printing　译后记

就在我们夜以继日地翻译胡迪·利普森先生和梅尔芭·库曼女士的《3D打印：从想象到现实》一书时，国内主流媒体正在对3D打印进行大篇幅报道，一时间4D打印赫然登场，由此国内3D和4D打印相关股票全线飘红。是炒作，还是憧憬？我们强烈感受到正在从事的翻译工作的意义。因为我们知道，我们正在翻译的这本书能够全面解答什么是3D打印、3D打印技术的现状以及未来的前景。

首先，我们说它是一本本着务实的精神、通过长期实地调查和面对面专访后写出的书，不是基于逻辑推理和实验室想象。其次，它是一本实效性很强的书，所引案例都发生在近期，具有现实的参考价值。最后，更重要的是，作者长期在行业前沿参与实践，不仅具有专业人士的洞察力，而且与目前世界上为数不多的3D打印研发机构和商业公司保持着良好的沟通，能够把握最新的动态，了解技术的进展，共享应用的喜悦。

很荣幸，中信出版社再次委托我们翻译如此重要的科技著作。

也很欣慰，中信出版社的领导和责任编辑相信我们可以在两个月内高质量地完成这本书的翻译工作。考虑到本书的专业性和深度，在赛迪研究院党委书记宋显珠的亲自领导下，我们从相关研究所和赛迪翻译公司抽调技术骨干和学者，成立了专家翻译组。感谢翻译组全体同人的共同努力，我们缩短了春节长假，终于在早春三月迎来了本书付梓出版。相信本书的及时出版一定有助于揭示3D打印技术的真相，有助于促进政府主管部门制定相关政策，有助于推动国内相关研究和开发走向深入。

本书第1~7章的初稿翻译由装备工业研究所的左世全、金伟、王凤丽、许斌、张艳、张弛和朱帅负责，第8~11章由原材料工业研究所的袁开洪、李丹、李茜和张海亮负责，第12和13章由工业经济研究所的刘春长、梁一新、张厚明和刘世磊负责，第14章由财经研究所的秦海林和关兵负责。初稿形成后，由国际合作处王乐、薛载斌全面负责集中统稿和校订。此外，还要感谢赛迪翻译公司的译审专家和中信出版社的资深编辑，正是他们渊博的知识和慷慨的指导为本译稿的质量和可读性提供了可靠的保障。

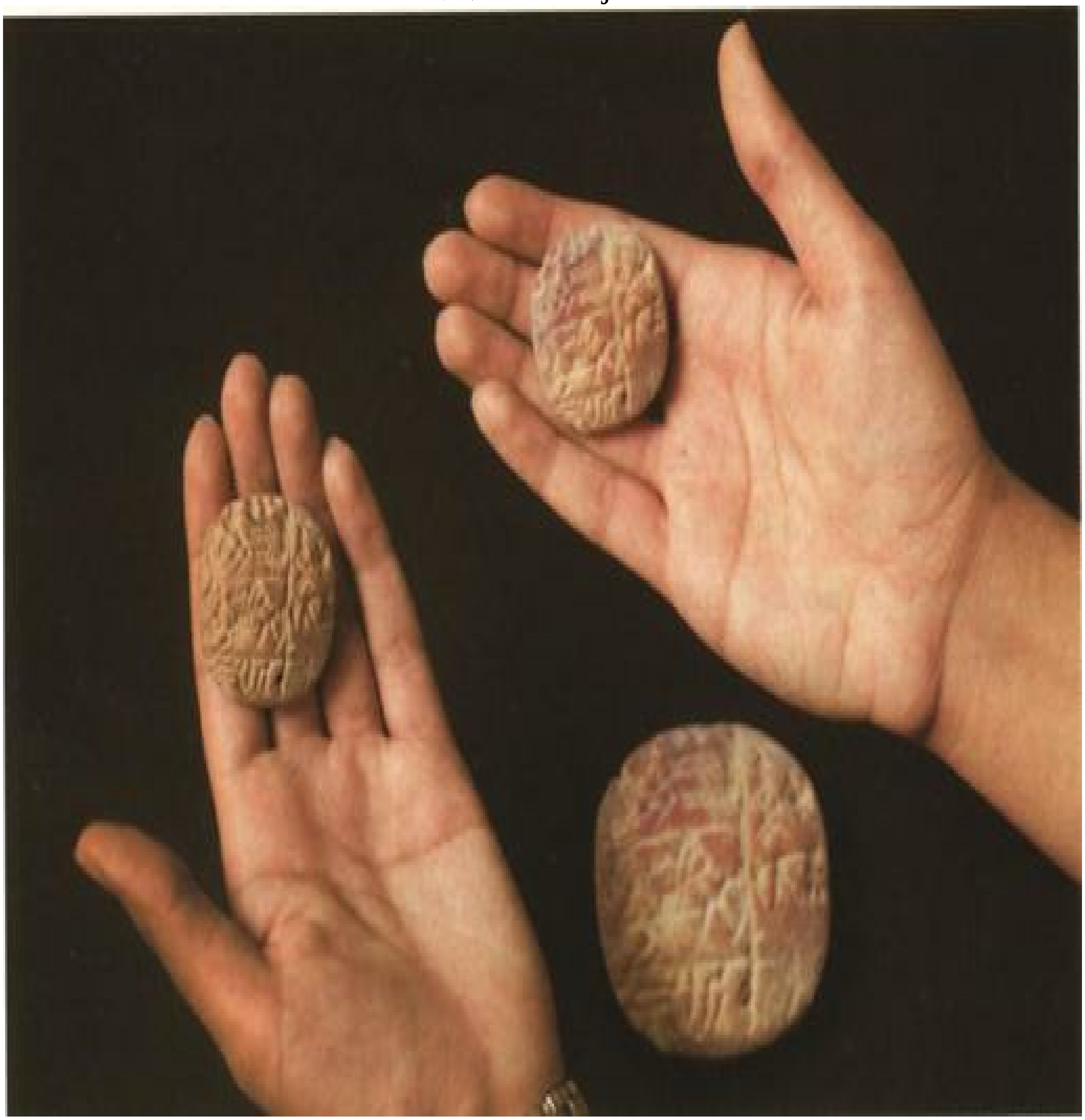


用石质材料打印的全尺寸长凳
图片来源：Andrea Morgante and Enrico Dini, D-Shape



注：多材料3D打印技术尚处于早期发展阶段。这个玩具实际上是一个复杂的加工产品，它由几种不同原材料制成，这些材料在打印过程中被混合在一起。

图片来源：Objet Inc.



注：CT扫描的珍贵文物可以被3D打印，用于保存和教育。左边是楔形文字原件，右边是3D打印副本，下方是放大后的副本。

图片来源：Cornell University. Curator David I.Owen; Design: Natasha Gangjee; Photo



注：打印功能部件。3D打印剪刀“开箱即用”，不需要组装或打磨。



注：图中的部件看起来像组装的砖块，实际上是预先组装3D打印出的，一次成型。

图片来源：Printed on ZPrinter 650 courtesy of 3D Systems



这只鞋的钛合金鞋底是3D打印一次成型制造的
图片来源：Kerrie Luft



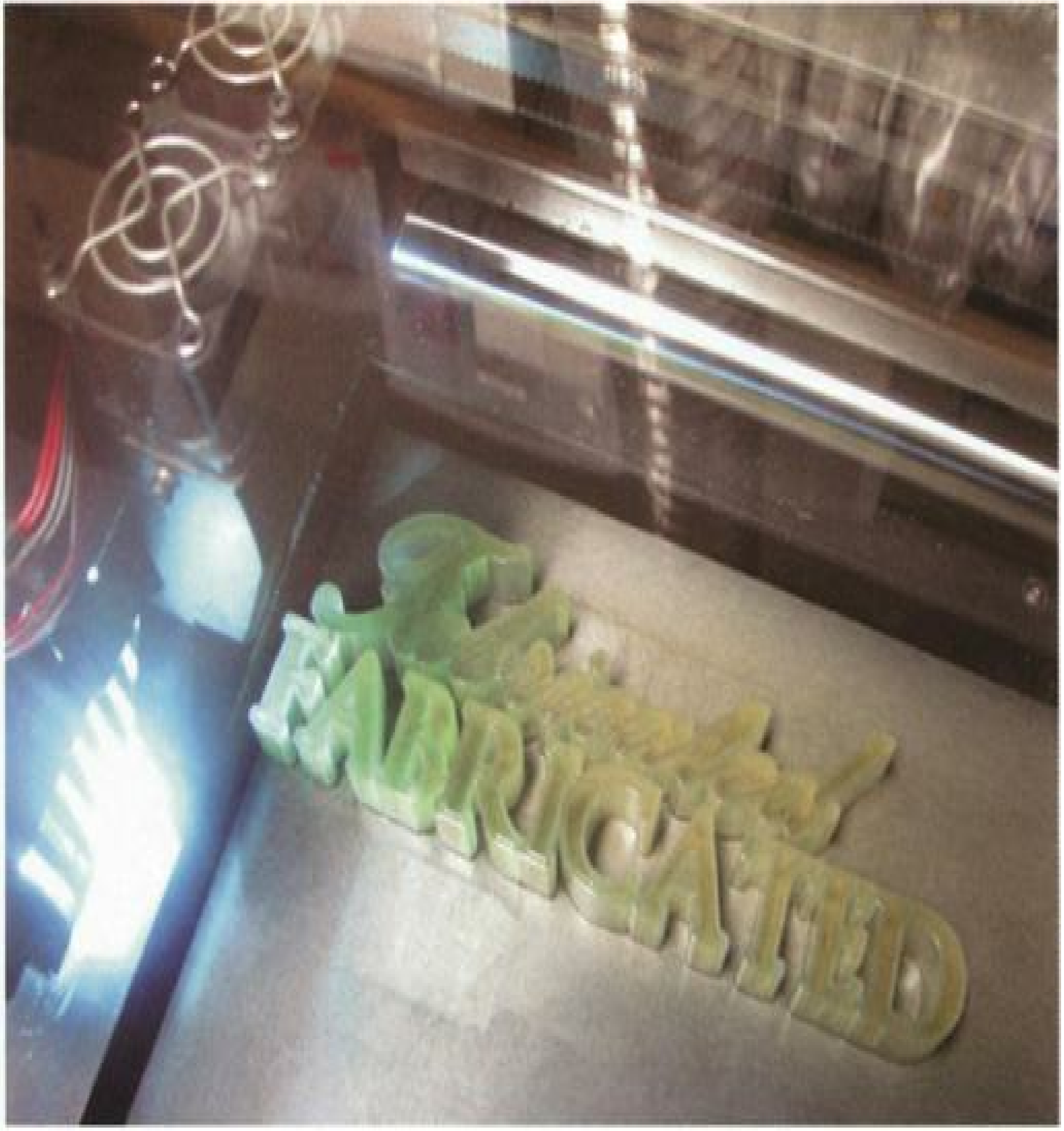
3D系统公司打印的电吉他
图片来源：Olaf Diegel, New Zealand



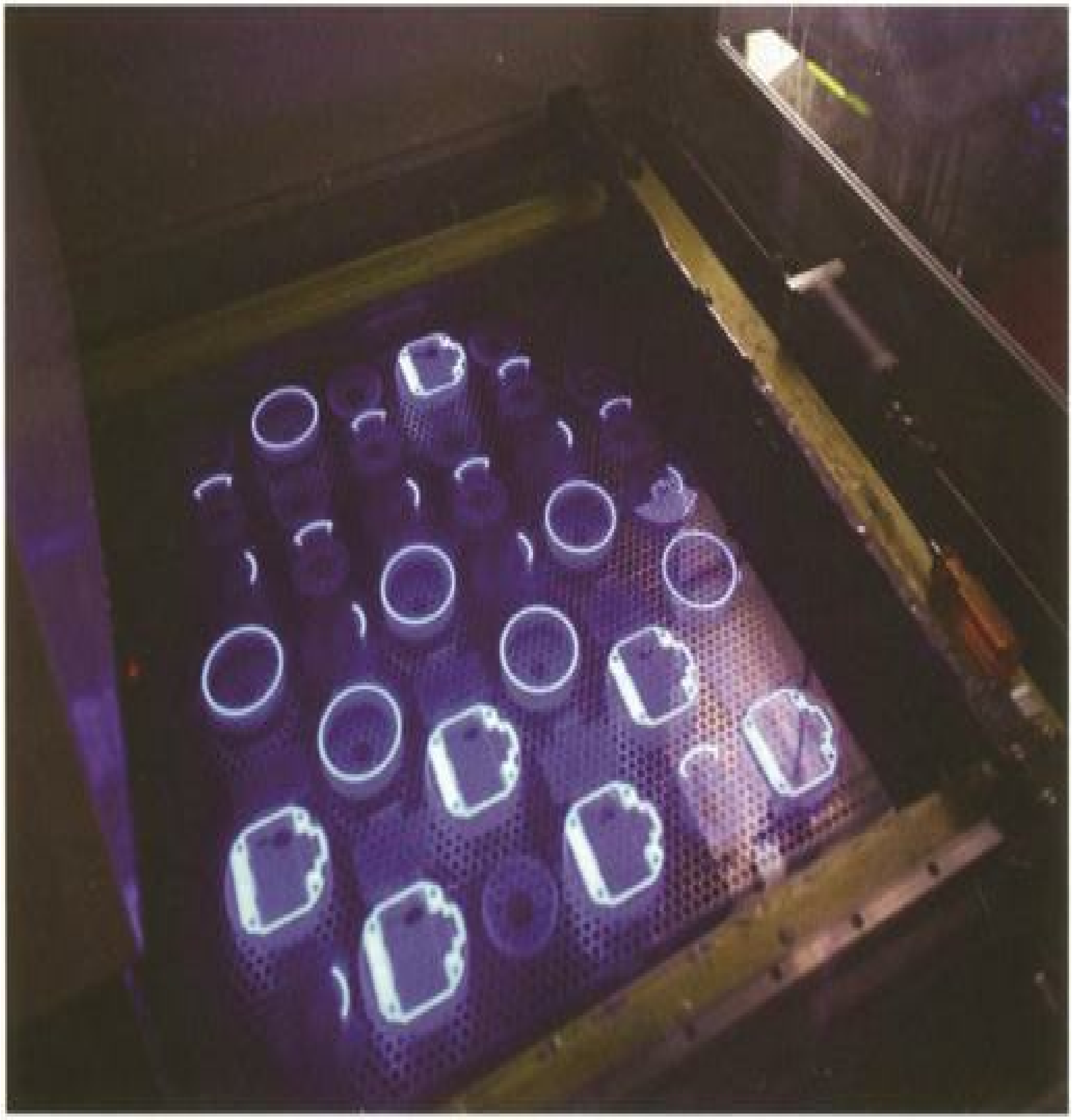
3D打印机打印出的实际大小的卡车驾驶室—各部件完整
图片来源： Objet Inc.



3D打印的最终模型：一座古老的修道院
图片来源：Midwest Studios. Photo: Ed Watson



Polyjet打印机制造的本书封面的候选样式



UV激光循着连续的横截面形状扫描，被固化的部分慢慢地沉入桶中
图片来源：Solid Concepts Inc.



一束激光正在熔融金属粉末，打印过程完成后物体最终被埋在粉末下
图片来源：Solid Concepts Inc.



将打印好的物体从粉床上拣出并清理

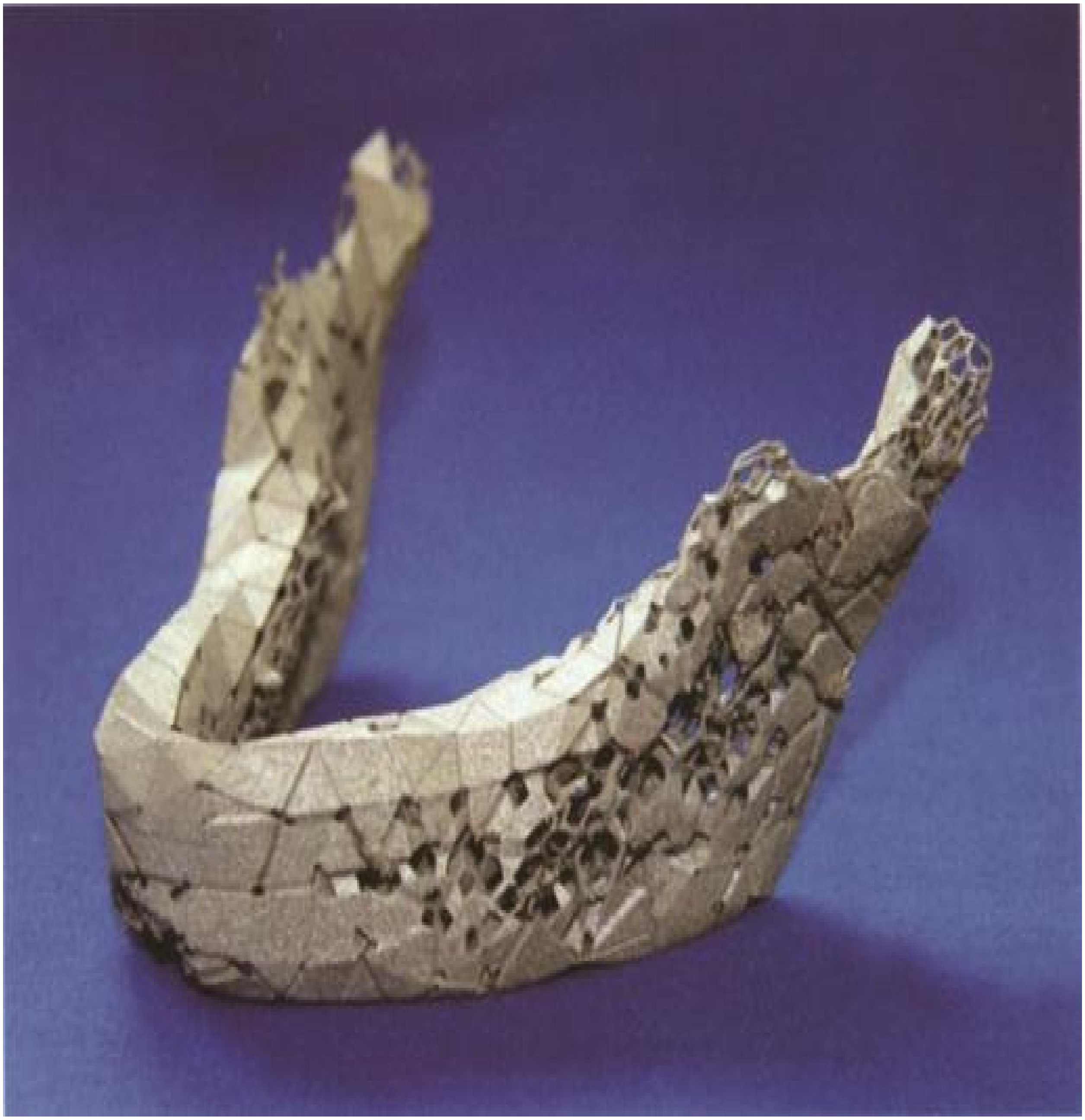
图片来源：3D Systems



使用Autodesk Inventor 软件3D打印出来的涡喷发动机实体模型
图片来源：Gonzalo Martinez, Autodesk



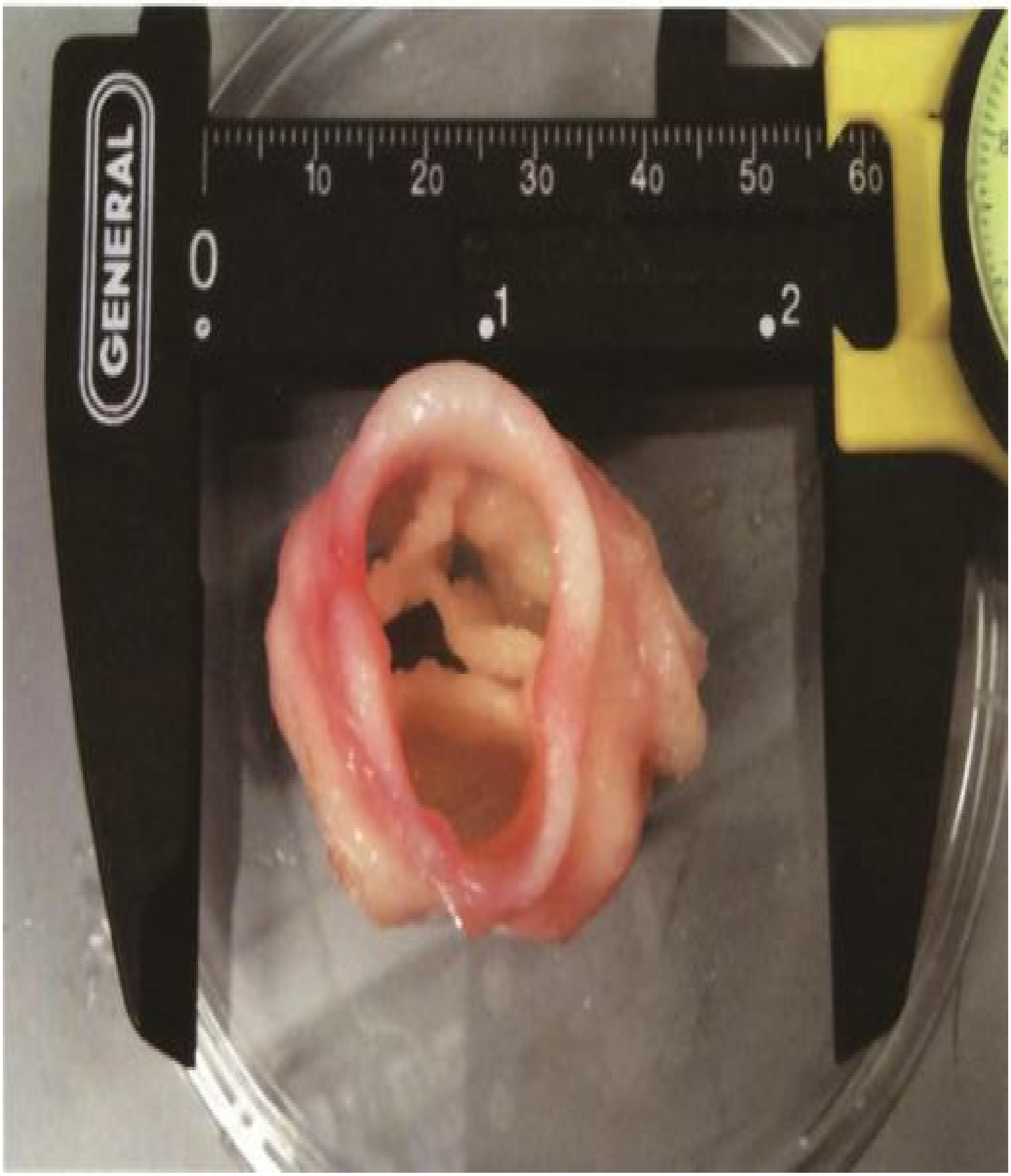
一个时尚的假肢
图片来源：3D Systems



一个新“出炉”的用金属粉末制造的下颌骨植入物

注：通过选择性激光熔融技术（金属骨泡沫）制造的具有仿生细胞结构的人类下颌骨。

图片来源：Fraunhofer IFAM



3D打印人造心脏瓣膜
图片来源：Jonthan Butcher, Cornell University



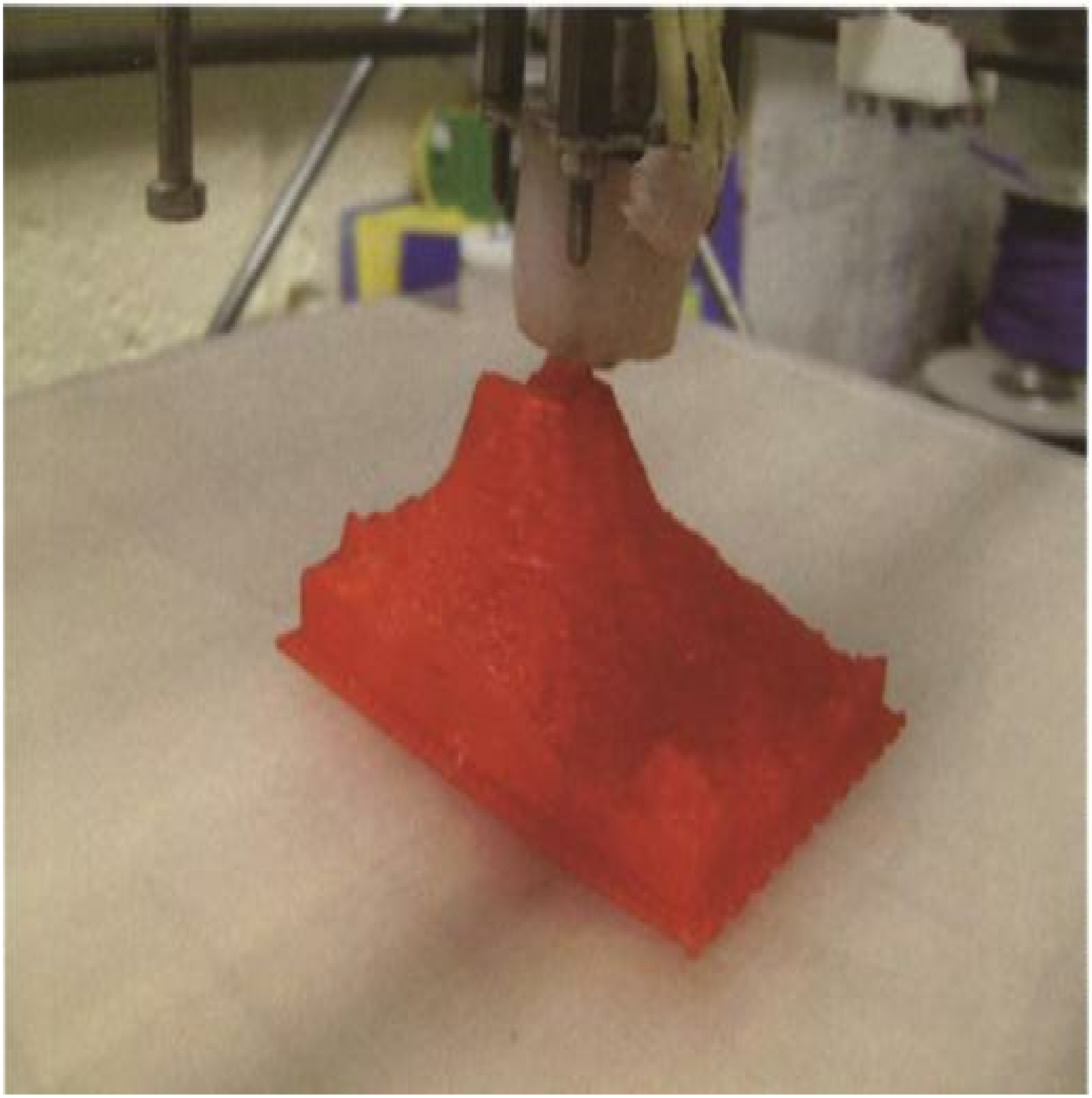
用于医学教学的基于CT扫描的打印模型
图片来源：Objet Inc.



加热原件熔融糖形成3D形状，不需要附加装配过程
图片来源：Windell H. Oskay, www.evilmadscientist.com



3D打印的章鱼形玉米面包
图片来源：Jeffrey Lipton, Cornell University



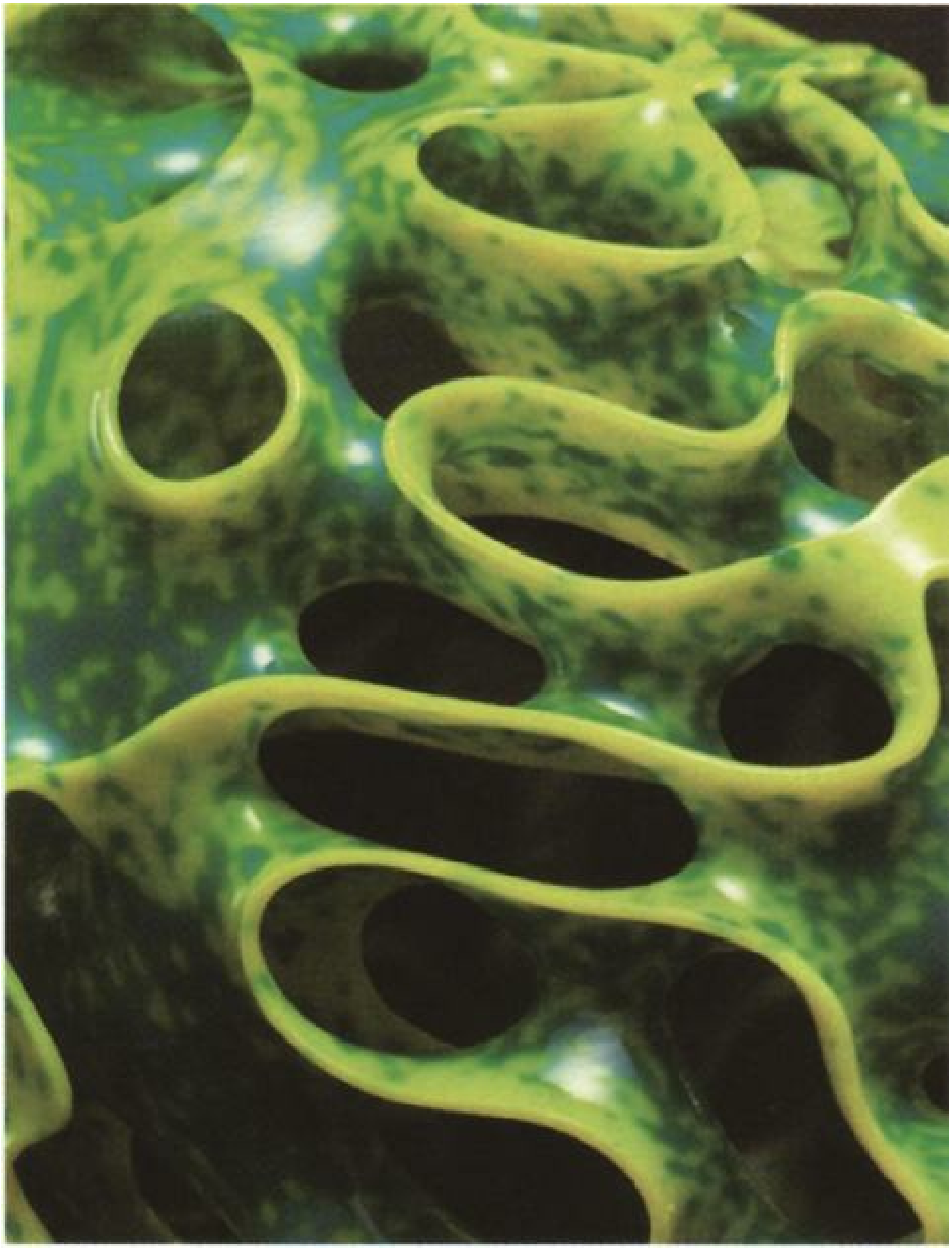
圣海伦火山3D打印模型
图片来源：Dave White, United Kingdom



基于模拟树枝结构和生长算法制作的咖啡桌
图片来源：MGX, a division of Materialise. Designed by Gernot Oberfell, Jan Wertel,

一。她利用3D打印技术制作由数学算法设计的图形，如玻璃、钢材和木材，而这类图形基本不能采用传统材料制作。

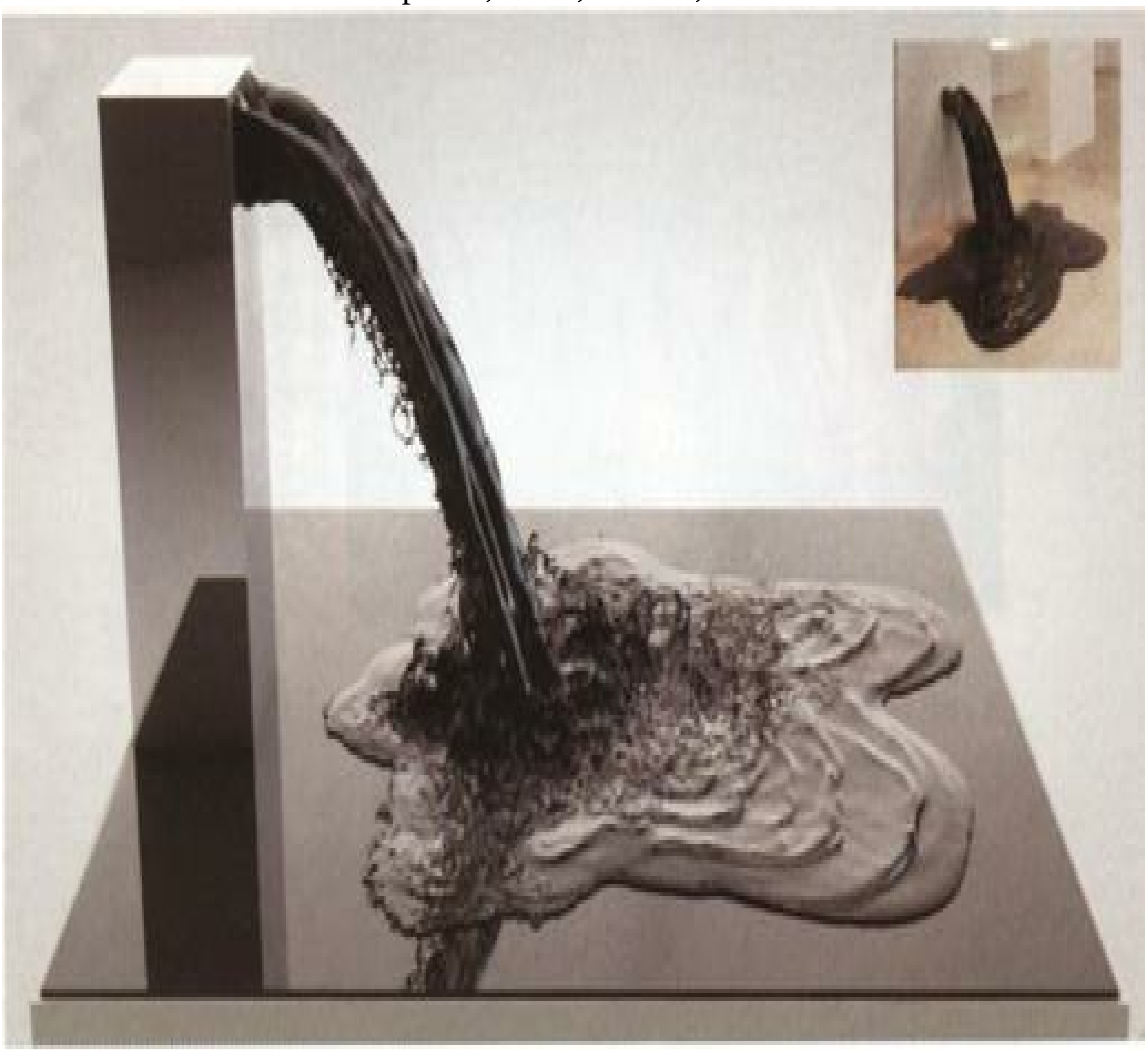
图片来源：Neri Oxman, W.Carter (MIT), Joe Hicklin (The Mathworks),



注：麻省理工学院教授内里·奥克斯纳姆是生成设计领域知名专家之一。她利用3D打印技术制作由数学算法设计的图形，如玻璃、钢材和木材，而这类图形基本不能采用传统材料制作。

图片来源：Neri Oxman, W.Carter (MIT), Joe Hicklin (The Mathworks),

Centre Pompidou, Paris, France, Photo: Yoram



油的瀑布

注：油的流动模拟被用来计算几何图形，然后将其“冻结”制作一个打印的模型（小图）

图片来源：Eyal Gever © 2012 All Rights Reserved www.eyalgever.com



注：由伦敦时装学院的罗斯·巴伯设计的3D打印鞋，由Within Technologies公司优化。里面的皮鞋手工缝制进去，以确保男模走秀时穿着的舒适度。

图片来源：Ross Barber



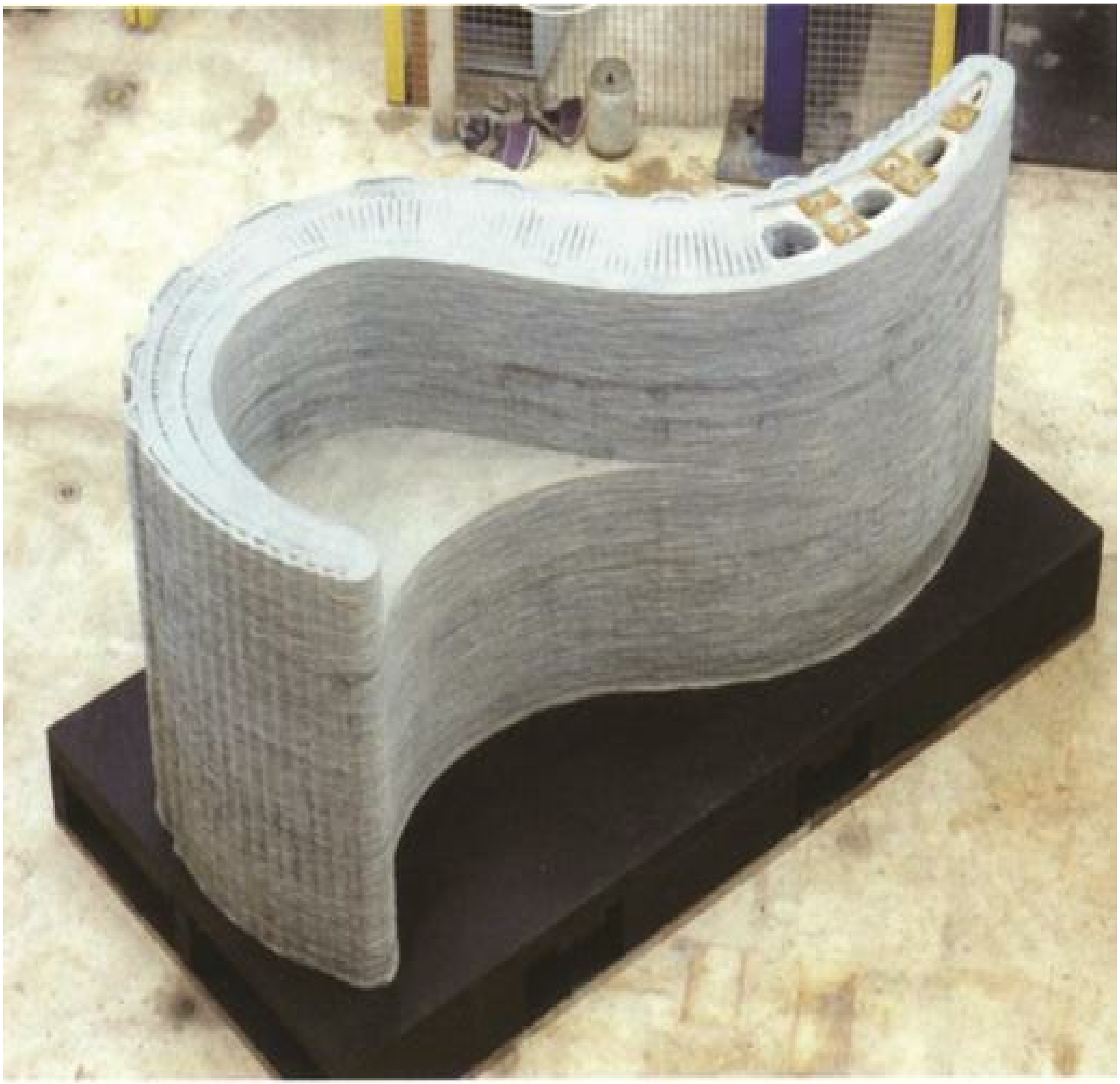
注：图中为无尽时尚设计工作室（Continuum Fashion）的詹娜·费瑟和黄玛丽设计的3D打印比基尼。

图片来源：Jenna Fizel and Mary Huang, Continuum Fashion



注：恩里科·迪尼用沙子和黏合剂打印出的结构。石面坚硬且光滑，外形和曲线很难用石头或大理石手工雕刻出来。

图片来源：Enrico Dini and Andrea



注："神奇板凳"是3D打印的水泥产品。使用传统的水泥浇灌技术不可能造出这种曲线和中空的内部管道。
图片来源：Sungwoo Lim and Richard Buswell. Photo: Agnese Sanvito

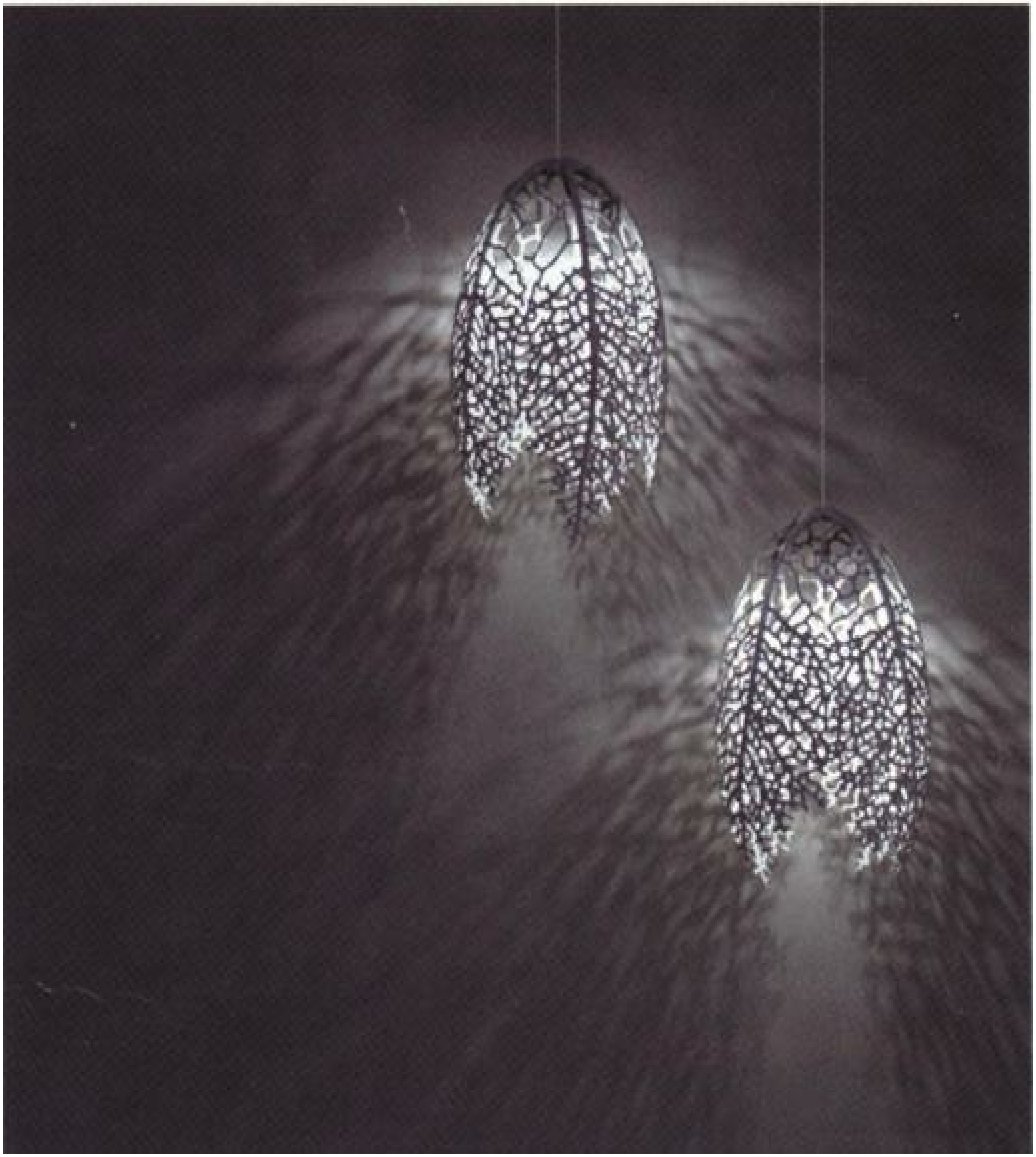


用3D打印塑料制造的口径为22毫米的步枪的部分
图片来源：Michael Guslick



注：李·格里格斯和托马斯·费尔南德斯·塞拉诺创造的场景。如果你仔细看，在中央穹顶左边可以看到戴着红帽子和绿帽子的马里奥兄弟。

图片来源：Lee Griggs (Solid Angle SL) and Tomás Fernandez Serraw (forominecraft. com). Rendered with the Arnold globad illumination rederer.



生长式设计可以用于设计更具有机外表和感觉的物品
图片来源：Nervous System, Inc



模拟–数字混合打印概念图

注：躯体是用透明的模拟介质打印的（表明光滑），里层是高仿立体像素组成的可视数字格状结构。

图片来源：Robert MacCurdy

Table of Contents

Table of Contents